



**Tugas Akhir TF 141581**

# **PERANCANGAN DAN ANALISIS SISTEM KONTROL FUZZY UNTUK KESTABILAN SEAKEEPING PADA KAPAL FPB 57**

**AGUNG WAHYU WIDODO**  
NRP. 2410 100 090

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.  
Aries Sulisetyono, ST, MA.Sc, PhD

**JURUSAN TEKNIK FISIKA**  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



**FINAL PROJECT TF141581**

# **DESIGN and ANALYSIS of FUZZY CONTROL FOR SEAKEEPING STABILITY ON FPB 57**

**AGUNG WAHYU WIDODO**  
**NRP. 2410 100 090**

**Supervisors**  
**Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.**  
**Aries Sulisetyono, ST, MA.Sc, PhD**

**DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2015**

## LEMBAR PENGESAHAN

### PERANCANGAN DAN ANALISIS SISTEM KONTROL FUZZY UNTUK KESTABILAN *SEAKEEPING* PADA KAPAL FPB 57

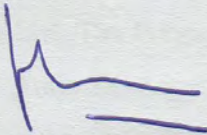
#### TUGAS AKHIR

Oleh:

**AGUNG WAHYU WIDODO**  
NRP. 2410 100 090

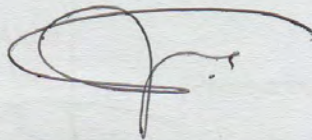
Surabaya, Juni 2015  
Mengetahui/Menyetujui

**Pembimbing I**



**Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T**  
NIP. 1966011619890321001

**Pembimbing II**



**Aries Sulisetvono, ST, MA.Sc, PhD**  
NIP. 197103201995121002

**Ketua Jurusan**  
**Teknik Fisika, FTI – ITS**



**Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA**  
NIP. 196503091990021001

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LEMBAR PENGESAHAN

### PERANCANGAN DAN ANALISIS SISTEM KONTROL FUZZY UNTUK KESTABILAN *SEAKEEPING* PADA KAPAL FPB 57

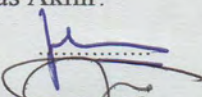
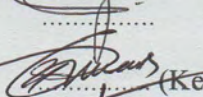
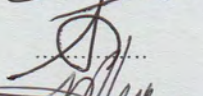
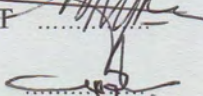
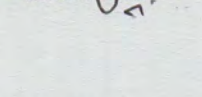
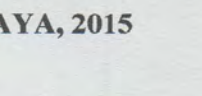
#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**AGUNG WAHYU WIDODO**  
**NRP 2410 100 090**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- |                                  |   |                     |
|----------------------------------|---|---------------------|
| 1. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT |    | (Pembimbing I)      |
| 2. Aries S, ST, MA.Sc, Ph.D      |   | (Pembimbing II)     |
| 3. Dr. Ir. Purwadi A. D, M.Sc    |  | (Ketua Tim Penguji) |
| 4. Ir. Syamsul Arifin, MT        |  | (Penguji I)         |
| 5. Dr. Ing. Doty Dewi R, ST, MT  |  | (Penguji II)        |
| 6. Bagus Tris Atmaja ST, MT      |  | (Penguji III)       |

**SURABAYA, 2015**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **PERANCANGAN dan ANALISIS SISTEM KONTROL FUZZY UNTUK KESTABILAN SEAKEEPING PADA KAPAL FPB 57**

**Nama** : Agung Wahyu Widodo  
**NRP** : 2410 100 090  
**Jurusan** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : 1. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT  
2. Aries Sulistyono, ST, MA. Sc,  
PhD

## ***Abstrak***

*Kapal FPB 57 adalah salah satu kapal yang digunakan oleh TNI AL untuk pelaksanaan patroli perlindungan dan keamanan wilayah laut Indoensia. Kapal FPB 57 sendiri digunakan untuk patroli di kawasan laut tepi Indonesia dikarenakan ukurannya dan kecepatan jelajahnya. Dalam pengoperasiannya, kapal FPB 57 diperlukan kriteria seakeeping untuk mengetahui perilaku kapal FPB 57 ketika beroperasi dengan adanya kehadiran ombak. Untuk mencapai kriteria seakeeping yang diperlukan, maka dirancang kontrol logika fuzzy, dengan gerak yaw dan roll sebagai variable yang dikendalikan. Dari hasil perancangan kontrol logika fuzzy, dapat diketahui bahwasannya kapal FPB 57 dapat beroperasi hingga keadaan sea state 3, dimana gerak yaw yang dialami oleh kapal FPB 57 sebesar 0.3365 radian dan gerak roll sebesar 0.34 radian. Selain itu, berdasarkan hasil perancangan kendali, dapat diketahui semakin besar sea state yang dialami oleh kapal FPB 57, semakin besar error steady state gerak roll yang dialami oleh kapal.*

*Kata Kunci :Kapal FPB 57, Fuzzy, Seakeeping, Roll, Yaw, Sea state*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



***DESIGN and ANALYSIS of FUZZY CONTROL FOR  
SEAKEEPING STABILITY ON FPB 57***

**Name** : Agung Wahyu Widodo  
**NRP** : 2410 100 090  
**Departement** : Engineering Physics Department,  
Faculty of Industrial Technology  
– ITS  
**Supervisors** : 1. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT  
2. Aries Sulisetyono, ST, MA.Sc,  
PhD

***Abstract***

*FPB 57 is one of TNI AL's ship used to patrol protect and guard of marine territories of Indonesia. FPB 57 is used to patrol on island side sea lines for its size and speed. In its operation, FPB 57 requires sea keeping criterion for obtaining its act when in its operation encounter sea waves. To obtaining required sea keeping criterion hence being designed fuzzy control logic system which yaw and roll motions are controlled variable. From designed fuzzy control system can be obtained that FPB 57 could operate normally until sea state 3, with 0.3365 radians for yaw movement and 0.34 radian for roll motion. Based on the results, error steady state increases as sea state increases respectively.*

*Keyword :FPB 57 Ship, Fuzzy, Seakeeping, Roll, Yaw, Sea State.*

*This page is left intentionally blank*

## **KATA PENGANTAR**

Assalamualaikum Wr. Wb

Segala puji bagi Allah, Tuhan seru sekalian alam serta shalawat serta salam tak lupa penulis sampaikan kepada Muhammad *Shallallahu Alayhi* Salam beserta *Ahlul Bait, Shahabah, Tabiin* yang telah menjadi suluh obor penerus terang tak berkesudahan. Semoga kasih dan ridhoNya selalu tercerah kepada mereka yang selalu menjangkau terang dan kebenaran.

Puji syukur sekali lagi saya haturkan pada Allah SWT, yang telah memberikan kesempatan, kekuatan, serta semua anugerah yang diberikan pada penulis, sehingga penulis mampu menngerkalan dan mentuntaskan tugas yang paling akhir sebelum penulis dinyatakan purna mahasiswa yang berjudul

### **PERANCANGAN DAN ANALISIS SISTEM KONTROL FUZZY UNTUK KESTABILAN SEAKEEPING PADA KAPAL FPB 57**

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan bagi seorang mahasiswa untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Tentunya dalam melaksanakan program ini, penulis tidak dapat bertindak sendiri, banyak elemen yang telah membantu penulis dari segala aspek yang penulis perlukan. Untuk itu dalam kata pembukaan ini penulis ingin menghaturkan rasa terima kasih kami kepada :

1. Bapak Mohammad Mashuda serta Ibu Nuryati dan Yunita Rahmawati yang selalu memberikan kasih dan dukungannya untuk penulis.
2. Ibu Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT dan Bapak Aries Sulisetyono, ST, MA.Sc, PhD selaku dosen pembimbing

tugas akhir yang selalu mengarahkan penulis dalam pengerjaan tugas akhir.

3. Fitri Adi Iskandarianto, ST, MT selaku dosen wali yang memberi motivasi kepada penulis selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Fisika.
4. Bapak Ir. Ya'umar, M.T. selaku kepala Laboratorium Rekayasa Instrumentasi atas segala saran dan kemudahan.
5. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA selaku ketua Jurusan Teknik Fisika, FTI – ITS.
6. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmunya dengan ikhlas sehingga penulis dapat menyelesaikan kuliah sampai tugas akhir ini.
7. Saudara Ekyal, Bonas, Uda dan Ongkk, Dek Riza dan Dek Kholish yang bersedia berbagi pemikiran dan memberikan solusi atas permasalahan tugas akhir yang dihadapi penulis.
8. Batoak Mahadewa, Acong, Paman Ndoblang dan Juragan Bodro yang menyemangati melalui gojekan dan ejekannya.
9. Kawan GL 14 *wa ashabih ajmain* yang selalu dapat memulihkan keceriaan dan sikap optimistis penulis untuk istiqomah mengerjakan tugas akhir.
10. Semua pihak yang terkait selama proses pengerjaan tugas akhir yang tidak dapat penulis sebutkan namanya satu persatu atas dukungan dan bantuannya.

Penulis menyadari bahwa selama pelaksanaan tugas akhir ini berlangsung, masih terdapat banyak kesalahan serta kekurangan. Untuk itu pada kata pembukaan ini penulis juga menyampaikan permintaan maaf kepada semua pihak yang merasa penulis repotkan.

Serta penulis mengharapkan kesediaan pihak–pihak terkait dalam tugas akhir ini untuk memberikan masukan atau semacamnya guna kesempurnaan tulisan penulis selanjutnya.

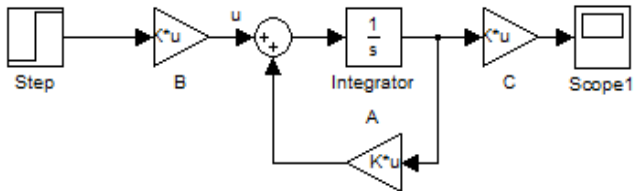
Surabaya, Maret 2015

Penulis

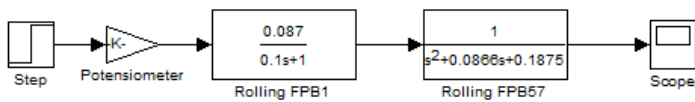
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN C

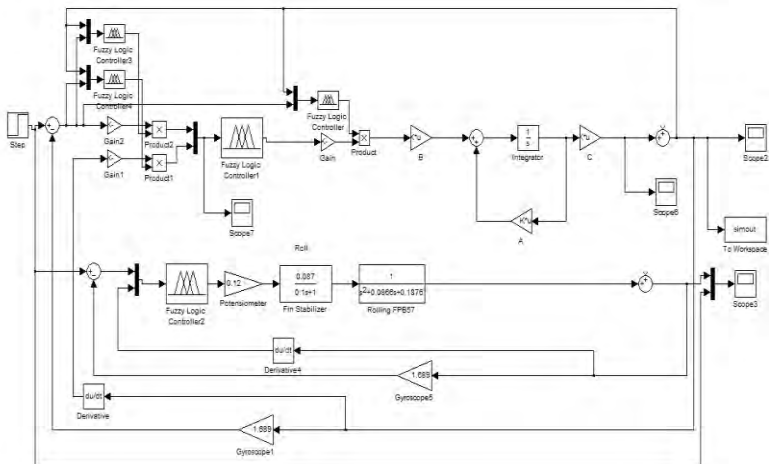
**MODEL SIMULASI  
KONTROL *OPEN LOOP* & *CLOSED LOOP***



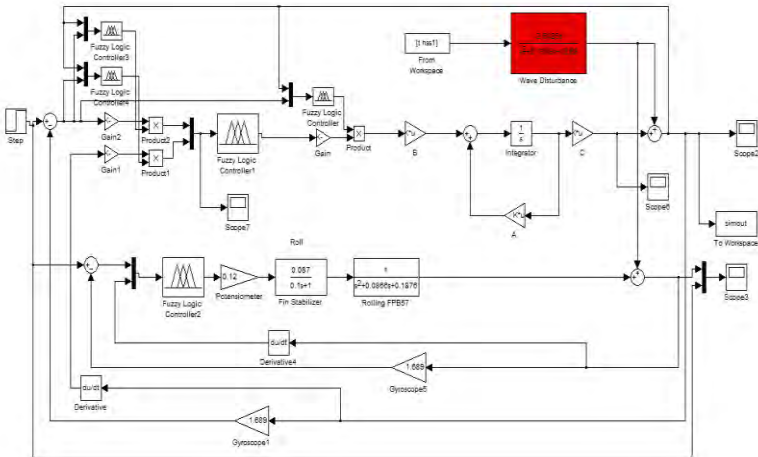
*Open loop model state-space gerak yaw kapal*



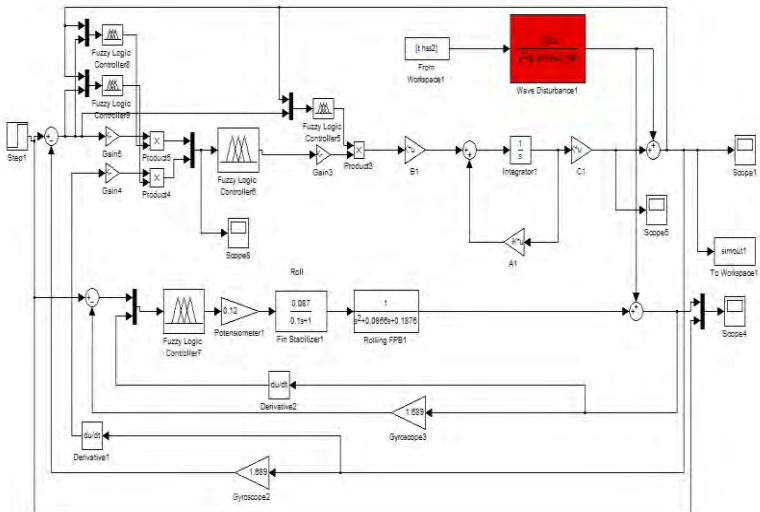
*Open loop model gerak roll kapal*



*Close loop model Hidrodinamika Kapal*

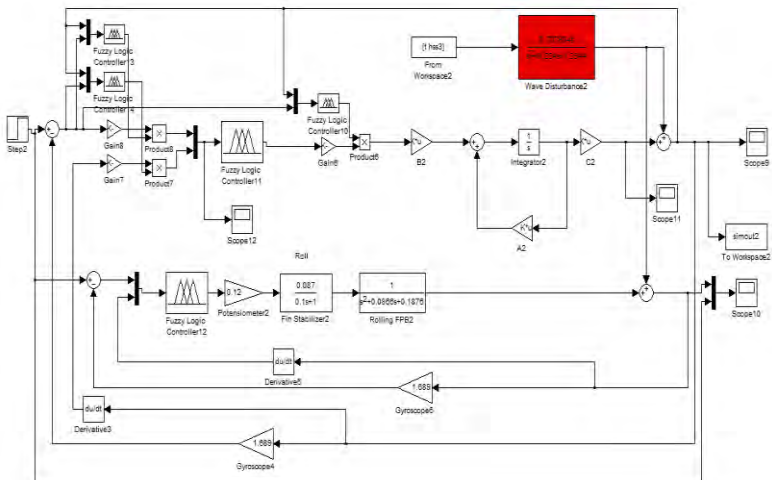


*Close loop model state space dengan gangguan sea state 1*

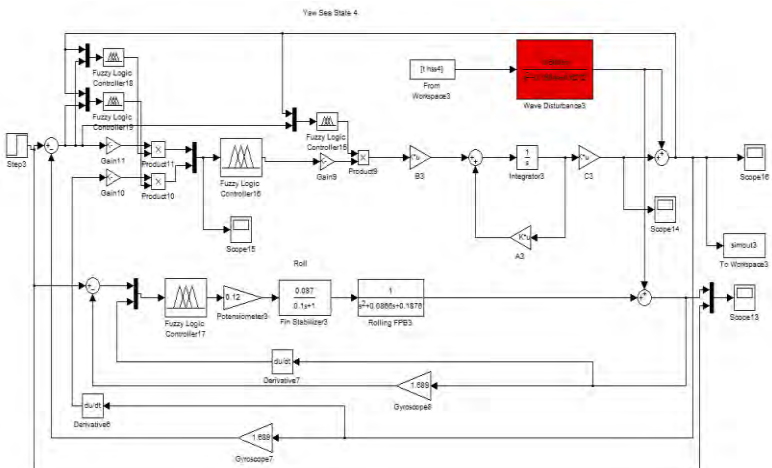


### Close loop model state space dengan gangguan sea state 2





*Close loop model state space dengan gangguan sea state 3*



*Close loop model state space dengan gangguan sea state 4*

## DAFTAR ISI

	Hal
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR NOTASI	xxi
 BAB I	
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
 BAB II	
TEORI PENUNJANG	5
2.1 Kapal <i>Fast Patrol Boat</i> (FPB) 57	5
2.2 Model Sistem Dinamika Kapal	6
2.2.1 Persamaan Sistem Kemudi Kapal	8
2.3 Gangguan Gelombang	11
2.3.1. Gangguan Frekuensi Rendah	12
2.3.2. Gangguan Frekuensi Tinggi	13
2.4 <i>Seakeeping</i>	14
2.5 Logika <i>Fuzzy</i>	14
2.5.1. Struktur Dasar Logika Fuzzy	14
2.5.2. Fungsi Keanggotaan Fuzzy	15

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Studi Literatur	22
3.2 Pengambilan Data	23
3.3 Pemodelan Sistem	23
3.4 Pemodelan Gangguan Gelombang	30
3.5 Blok Sistem Kontrol Kapal	31
3.6 Perancangan Kendali Logika Fuzzy	33
 BAB IV	
HASIL dan PEMBAHASAN	47
4.1 Analisis Penguian Open Loop dari FPB 57	47
4.2 Analisis Kapal Respon <i>Roll</i> dan <i>Yaw</i> FPB 57 dengan Penerapan Kendali Logika Fuzzy	49
4.2.1 Analisis <i>Rule Base</i> yang Telah Disusun Berdasarkan Respon yang Dihasilkan	51
4.2.2 Perubahan <i>Rule Base</i> Sistem Kendali Logika Fuzzy	51
4.2.3 Uji <i>Close Loop</i> Tanpa Gangguan Gelombang	52
4.2.4 Analisis Kapal FPB 57 dengan Gangguan Gelombang <i>Sea State 1</i>	54
4.2.5 Analisis Kapal FPB 57 dengan Gangguan Gelombang <i>Sea State 2</i>	56
4.2.6 Analisis Kapal FPB 57 dengan Gangguan Gelombang <i>Sea State 3</i>	58
4.2.7 Analisis Kapal FPB 57 dengan Gangguan Gelombang <i>Sea State 4</i>	60
4.3 Pembahasan	62
 BAB V	
PENUTUP	65
5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran	66

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Notasi yang digunakan	7
<b>Tabel 2.2</b>	Variabel normalisasi <i>Prime-System I</i>	11
<b>Tabel 2.3</b>	<i>Sea State Description</i>	12
<b>Tabel 3.1</b>	Daftar Acuan Pustaka yang Digunakan	20
<b>Tabel 3.2</b>	Periode Roll Kapal	27
<b>Tabel 3.3</b>	Basis aturan kendali logika <i>fuzzy</i> <i>rudder</i>	37
<b>Tabel 3.4</b>	Basis aturan kendali logika <i>fuzzy</i> <i>fin</i> <i>stabilizer</i>	40
<b>Tabel 4.1</b>	<i>Rule Base</i> Kendali Logika Fuzzy gerak <i>yaw</i> Data Analisis Uji Simulasi <i>Roll</i> dengan Gangguan Gelombang	52
<b>Tabel 4.2</b>	Data Analisis Uji Simulasi <i>Yaw</i> dengan Gangguan Gelombang	63
<b>Tabel 4.3</b>	Data Analisis Uji Simulasi <i>Roll</i> dengan Gangguan Gelombang	63

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar</b>	<b>2.1</b>	Kapal FPB 57: KRI Todak (803)	5
<b>Gambar</b>	<b>2.2</b>	Gerak yang Terjadi pada Kapal	7
<b>Gambar</b>	<b>2.3</b>	Skema <i>Fuzzy</i>	15
<b>Gambar</b>	<b>2.4</b>	Bentuk Fungsi Keanggotaan Gaussian	16
<b>Gambar</b>	<b>2.5</b>	Bentuk Fungsi Keanggotaan Segitiga	17
<b>Gambar</b>	<b>2.6</b>	Bentuk Fungsi Keanggotaan Trapesium	18
<b>Gambar</b>	<b>3.1</b>	Diagram Alir Tugas Akhir	19
<b>Gambar</b>	<b>3.2</b>	Diagram Blok <i>Fin Stabilizer</i>	28
<b>Gambar</b>	<b>3.3</b>	Diagram Blok <i>Fin Stabilizer Sederhana</i>	30
<b>Gambar</b>	<b>3.4</b>	Diagram Blok Pengendalian	32
<b>Gambar</b>	<b>3.5</b>	Diagram Alir Kendali Logika <i>Fuzzy</i>	33
<b>Gambar</b>	<b>3.6</b>	Kendali Logika <i>Fuzzy Rudder</i>	34
<b>Gambar</b>	<b>3.7</b>	Fungsi Keanggotaan <i>yawrate</i>	35
<b>Gambar</b>	<b>3.8</b>	Fungsi Keanggotaan <i>error yaw</i>	35
<b>Gambar</b>	<b>3.9</b>	Fungsi Keanggotaan <i>rudder</i>	36
<b>Gambar</b>	<b>3.10</b>	Tampilan <i>Surface</i> dari Kontrol <i>Fuzzy</i>	37
<b>Gambar</b>	<b>3.11</b>	Kendali Logika <i>Fuzzy Fin Stabilizer</i>	38
<b>Gambar</b>	<b>3.12</b>	Fungsi Keanggotaan <i>error roll</i>	38
<b>Gambar</b>	<b>3.13</b>	Fungsi Keanggotaan <i>rollrate</i>	39
<b>Gambar</b>	<b>3.14</b>	Fungsi Keanggotaan <i>finstab</i>	40
<b>Gambar</b>	<b>3.15</b>	Tampilan <i>Surface</i> Kendali <i>fin stabilizer</i>	41
<b>Gambar</b>	<b>3.16</b>	<i>Fuzzy Gain Controller</i>	42
<b>Gambar</b>	<b>3.17</b>	Fungsi Keanggotaan <i>error yaw</i>	43
<b>Gambar</b>	<b>3.18</b>	Fungsi Keanggotaan <i>yawrate</i>	43
<b>Gambar</b>	<b>3.19</b>	Fungsi Keanggotaan <i>gain k</i>	44
<b>Gambar</b>	<b>3.20</b>	Tampilan <i>Surface Fuzzy Gain Control</i>	44
<b>Gambar</b>	<b>4.1</b>	Respon Open Loop <i>Yaw</i> dari FPB 57	47
<b>Gambar</b>	<b>4.2</b>	Respon <i>Open Loop Roll</i> dari FPB 57	48
<b>Gambar</b>	<b>4.3</b>	Respon <i>Yaw Sea State 1</i>	49
<b>Gambar</b>	<b>4.4</b>	Respon <i>Roll Sea State 1</i>	50
<b>Gambar</b>	<b>4.5</b>	Respon <i>Close loop Yaw</i>	52
<b>Gambar</b>	<b>4.6</b>	Respon <i>Close loop Roll</i>	53
<b>Gambar</b>	<b>4.7</b>	Respon <i>Close loop Yaw Sea state 1</i>	54

<b>Gambar</b>	<b>4.8</b>	Respon <i>Close loop</i> Roll Sea state 1	55
<b>Gambar</b>	<b>4.9</b>	Respon <i>Close loop</i> Yaw Sea state 2	56
<b>Gambar</b>	<b>4.10</b>	Respon <i>Close Loop</i> Roll Sea state 2	57
<b>Gambar</b>	<b>4.11</b>	Respon <i>Close loop</i> Yaw Sea state 3	58
<b>Gambar</b>	<b>4.12</b>	Respon <i>Close loop</i> Roll Sea state 3	59
<b>Gambar</b>	<b>4.13</b>	Respon <i>Close loop</i> Yaw Sea State 4	60
<b>Gambar</b>	<b>4.14</b>	Respon <i>Close loop</i> Roll Sea State 4	61

## DAFTAR NOTASI

$\eta$	=	vektor orientasi arah
$x$	=	posisi <i>surge</i> (m)
$y$	=	posisi <i>sway</i> (m)
$z$	=	posisi <i>heave</i> (m)
$\phi$	=	sudut <i>roll</i> (rad)
$\theta$	=	sudut <i>pitch</i> (rad)
$\psi$	=	sudut <i>yaw</i> (rad)
$\psi_L$	=	sudut <i>yaw</i> frekuensi rendah (rad)
$\psi_H$	=	sudut <i>yaw</i> frekuensi tinggi (rad)
$u$	=	kecepatan <i>surge</i> (m/s)
$v$	=	kecepatan <i>sway</i> (m/s)
$w$	=	kecepatan <i>heave</i> (m/s)
$p$	=	kecepatan <i>roll</i> (rad/s)
$q$	=	kecepatan <i>pitch</i> (rad/s)
$r$	=	kecepatan <i>yaw</i> (rad/s)
$\dot{u}$	=	percepatan <i>surge</i> (m/s <sup>2</sup> )
$\dot{v}$	=	percepatan <i>sway</i> (m/s <sup>2</sup> )
$\dot{r}$	=	percepatan <i>yaw</i> (rad/s <sup>2</sup> )
$J(\eta)$	=	matriks transformasi
$X$	=	gaya <i>surge</i> (N)
$Y$	=	gaya <i>sway</i> (N)
$Z$	=	gaya <i>heave</i> (N)
$N$	=	momen <i>yaw</i> (Nm)
$M_{RB}$	=	matriks massa dan inersia kapal
$X_{...}$	=	turunan gaya <i>surge</i> terhadap ...
$Y_{...}$	=	turunan gaya <i>sway</i> terhadap ...
$N_{...}$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap ...
$M$	=	matriks inersia
$D$	=	matriks redaman
$m$	=	massa kapal
$X_{\dot{u}}$	=	turunan gaya arah <i>surge</i> terhadap $\dot{u}$ (Ndet <sup>2</sup> /m)
$Y_{\dot{v}}$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap $\dot{v}$ (Ndet <sup>2</sup> /m)
$N_{\dot{r}}$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap $\dot{r}$ (Ndet <sup>2</sup> )



$X_u$	=	turunan gaya arah <i>surge</i> terhadap $u$ (Ndet/m)
$Y_v$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap $v$ (Ndet/m)
$Y_r$	=	turunan momen <i>sway</i> terhadap $r$ (N/det)
$N_v$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap $v$ (N/det)
$N_{\dot{v}}$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap $\dot{v}$ (Ndet <sup>2</sup> )
$N_r$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap $r$ (Ndet <sup>2</sup> )
$I_z$	=	momen inersia terhadap sumbu $z$ (Nm)
$X'$	=	Gaya <i>surge</i> non dimensi
$Y'$	=	gaya <i>sway</i> non dimensi
$N'$	=	momen <i>yaw</i> non dimensi
$u_c$	=	Kecepatan arah <i>surge</i> (m/detik)
$\beta_c$	=	Arah arus laut (rad)
$v_c$	=	Kecepatan arus arah <i>sway</i> (m/detik)
$r_c$	=	Kecepatan arus arah <i>yaw</i> (rad/detik)
$\delta$	=	defleksi rudder (derajat)
$x_G$	=	pusat massa (m)
$\rho$	=	rapat massa air laut (1014 kg/m <sup>3</sup> )
$g$	=	percepatan gravitasi bumi (9.8 m/det <sup>2</sup> )
$L$	=	panjang kapal (m)
$U$	=	kecepatan servis kapal (m/det)
$B$	=	lebar kapal (m)
$T$	=	kedalaman kapal (m)
$\nabla$	=	<i>displacement</i> (m <sup>3</sup> )
$C_B$	=	koefisien blok
$V_L$	=	vektor kecepatan kapal frekuensi rendah (m/det)
$V_c$	=	vektor kecepatan arus (m/det)
$\xi_x$	=	posisi <i>surge</i> akibat gelombang frekuensi tinggi (m)
$\xi_y$	=	posisi <i>sway</i> akibat gelombang frekuensi tinggi (m)
$\xi_\psi$	=	posisi <i>yaw</i> pada gelombang frekuensi tinggi (rad)
$\dot{x}_H$	=	laju <i>surge</i> akibat gelombang frekuensi tinggi (m/detik)

$\dot{y}_H$	=	laju <i>sway</i> akibat gelombang frekuensi tinggi (m/detik)
$\dot{\psi}_H$	=	laju <i>yaw</i> akibat gelombang frekuensi tinggi (rad/detik)
$x$	=	variabel state
$\dot{x}_L$	=	variabel state frekuensi rendah
$A_L$	=	matriks sistem frekuensi rendah
$x_L$	=	variabel state frekuensi rendah
$\tau_L$	=	kontrol input frekuensi rendah
$E_L$	=	matriks gangguan frekuensi rendah
$Hs$	=	tinggi gelombang signifikan (m)
$\sigma_\omega$	=	intensitas gelombang
$\varepsilon$	=	koefisien redaman
$\omega_0$	=	frekuensi modal gelombang (rad/det)
$H(s)$	=	fungsi transfer gelombang
$\xi$	=	rasio redaman sistem
$\omega_n$	=	frekuensi alami sistem
$u$	=	sinyal kontrol (keluaran controller)
$y$	=	keluaran dari sistem yang dikontrol

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama Agung Wahyu Widodo yang dilahirkan di Mojokerto pada tanggal 15 Juni 1992. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN 06 Samarinda, SMPN 2 Samarinda, dan SMAN 1 Samarinda. Pendidikan tinggi ditempuh oleh penulis di Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri – Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2010. Saat mahasiswa, penulis sempat aktif di beberapa organisasi kemahasiswaan internal dan eksternal kampus, antara lain Unit Kegiatan Mahasiswa PLH SIKLUS ITS, Dewan Perwakilan Mahasiswa (DPM) Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan Himpunan Mahasiswa Islam (HMI) Cabang Surabaya. Penulis memiliki ketertarikan pada bidang instrumentasi kontrol, *policy-maker engineering*, sosial – politik, sejarah, filsafat dan sastra. Hobi penulis antara lain membaca, diskusi, menulis dan kegiatan alam bebas. Penulis dapat dihubungi melalui email [agunglingai@gmail.com](mailto:agunglingai@gmail.com)

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia merupakan negara yang memiliki wilayah lautan dengan luas sebesar 5,8 juta km persegi. Hal ini menjadikan Indonesia sebagai negara yang memiliki wilayah maritim terbesar di dunia. Dengan luas lautan mencapai 5,8 juta km persegi, dibutuhkan mekanisme untuk melakukan perlindungan dan pengawasan wilayah teritorial laut Indonesia. Sistem dan alasan pengawasan teritorial yang dimiliki oleh Negara Kesatuan Republik Indonesia saat ini hanya bergantung pada penggunaan kapal perang dan kapal patrol. Dengan letak geografis Indonesia yang terletak diantara Laut Hindia dan Laut Pasifik, pergerakan cuaca laut yang diantaranya ketinggian gelombang bervariasi bergantung pada musim yang ada di Indonesia. Demikian *Fast Patrol Boat* (FPB) 57 yang digunakan sebagai instrument pengawasan dihadapkan dengan kondisi diantaranya ketinggian ombak yang bervariasi.

Dinamika yang dialami kapal terbagi menjadi dua, yaitu dinamika translasi dan dinamika rotasi. Dinamika translasi terdiri atas *surge*, *sway* dan *heave* serta *yaw*, *roll* dan *pitch* untuk dinamika rotasi. Hal yang terpenting dalam kendali kapal adalah sistem *autopilot steering* dari kapal. Sistem *autopilot* digunakan untuk mengarahkan gerak kapal, baik gerakan lurus, maneuver atau mengikuti rute yang telah ditentukan. Kendali *autopilot* berdasarkan belokan sudut yang dilakukan oleh *rudder* serta *fin stabilizer*. Gerakan *rudder* dan *fin stabilizer* tentunya dipengaruhi oleh keadaan lingkungan sekitar kapal, seperti ombak laut, arus air laut, arah angin dan sebagainya. Perilaku kapal yang dipengaruhi oleh berbagai keadaan lingkungan dalam penelitian dimodelkan secara matematis, baik aspek dinamika kapal maupun aspek gangguan yang dialami kapal (Fang, Lin, & Wang, 2012).

Pemodelan matematis dinamika kapal, dilakukan penyederhanaan dari enam derajat kebebasan dengan menjadi tiga derajat kebebasan kapal. Hal ini dikarenakan pada penelitian ini

dilakukan peninjauan perilaku kestabilan kapal terhadap berbagai ketinggian ombak (Tomera, 2010). Perilaku kestabilan kapal merupakan salah satu aspek yang berhubungan performansi kontrol kapal. Salah satu aspek performansi yang perlu ditinjau adalah kestabilan *seakeeping* suatu kapal. Hal ini penting karena *seakeeping* memperhatikan kemanan serta kenyamanan penumpang serta jumlah bahan bakar yang diperlukan kapal yang diakibatkan gerak dinamis laut, yang pada penelitian ini adalah gelombang (Riola, Esteban, Girón-Sierra, & Aranda, 2001).

Pada penelitian ini, perilaku kestabilan *seakeeping* ditinjau melalui gerak yang dialami kapal dengan gangguan berupa berbagai ketinggian gelombang. Dan gelombang yang datang dialami pada kapal berasal dari berbagai arah. Gelombang yang dialami pada kapal memiliki ketinggian yang berbeda beda, ketinggian gelombang di laut dinyatakan dalam bentuk *sea state* (Fossen, 2011). Kapal yang berada di permukaan laut akan mengalami gerak yang ditimbulkan oleh adanya gelombang yang mengenai kapal. Antara lain gerak menggeser (*sway*) yang terjadi ketika kapal dikenai gelombang dari depan maupun belakang dan gerakan membelok (*yaw*) serta gerakan mengoleng (*roll*) dimana gerak *roll* yang dialami kapal FPB 57 sendiri tidak boleh melewati 23 derajat.

Dengan demikian, dalam tugas akhir ini penulis ingin melakukan perancangan serta analisis control yang tepat untuk operasional kapal khususnya *seakeeping* perang pada perbagai ketinggian ombak.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang diatas maka rumus masalah yang harus terjawab:

1. Bagaimana merancang kontrol dengan menggunakan metode *fuzzy* pada mode *seakeeping* pada kapal patrol FPB 57.
2. Bagaimana hasil perancangan dan respon hasil gerakan kapal FPB 57 dengan perlakuan pelbagai ketinggian gelombang untuk gerakan *roll* dan *yaw*.

3. Bagaimana analisa hasil respon gerakan kapal FPB 57 ketika mengalami gelombang sebesar *Sea State* 1 hingga *Sea State* 4.

### **1.3 Batasan Masalah**

Agar pembahasan tidak meluas dan menyimpang dari tujuan dan rumusan masalah, akan diberikan beberapa batasan permasalahan dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. Objek yang diteliti adalah kapal patrol FPB 57.
2. Metode yang digunakan untuk sistem perancangan sistem kontrol berbasis logika *fuzzy*.
3. Variabel yang dikendalikan adalah *roll* dan *yaw*.
4. Variabel gangguan yang digunakan berupa ketinggian gelombang laut, *sea state* 1 hingga *sea state* 4.
5. Simulasi hasil perancangan sistem kendali dilakukan pada perangkat lunak MatLab R2009b.

### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk merancang sistem kontrol *seakeeping* beserta analisis respon performansi yang dihasilkan dari pemberian gangguan berupa variasi ketinggian gelombang pada kapal FPB 57.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan manfaat bagi penelitian selanjutnya untuk mengembangkan perancangan kestabilan *seakeeping* pada kapal FPB 57 yang kedepannya dapat melakukan perancangan kestabilan pada kapal jenis lain serta memberikan bahan perbandingan dengan penelitian yang akan datang.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## **BAB II**

### **TEORI PENUNJANG**

#### **2.1 Kapal Fast Patrol Boat (FPB) 57**

Kapal Patrol Cepat (*Fast Patrol Boat*, FPB 57), merupakan salah satu alat ketahanan negara yang digunakan dan dimiliki oleh Angkatan Laut dari Tentara Nasional Indonesia (TNI AL). Pada awalnya FPB 57 dibuat di Lurssen, Jerman hingga didatangkan ke Indonesia pada tahun 1988 dengan nama KRI Kakap (1988). Hingga tahun 1992, FPB 57 dibuat langsung oleh PT. PAL Indonesia sampai pada FPB 57 Nav V pada tahun 2004.

Sesuai dengan fungsinya, FPB 57 dilengkapi dengan persenjataan, antara lain: meriam bofors SAK 57mm/70 dan 40mm/70 yang berkemampuan sebagai anti kapal, pesawat udara, helicopter, rudal balistik serta rudal anti kapal; Torpedo AEG SUT yang berkemampuan sebagai anti kapal selam dan anti kapal permukaan, serta; rudal C802. Disamping persenjataan, kapal ini memiliki kapasitas maksimal 42 awak. Salah satu kapal FPB 57 yang digunakan oleh TNI AL adalah KRI Todak dengan nomor lambung 803 yang ditunjukkan pada gambar 2.1 berikut.



**Gambar 2.1** Kapal FPB 57: KRI Todak (803) (tnial.id)

Dengan fitur yang telah disebutkan sebelumnya, data spesifikasi dimensi dari kapal FPB 57 adalah sebagai berikut:

Panjang

LOA : 58,1 meter

LWL : 54,4 meter

Lebar (*Beam*) : 7,62 meter

Tinggi (*Height*) : 4,75 meter

Sarat (*Draught*) : 2,95 meter

Kecepatan Kapal : 28 knot = 14,4 m/s

Massa Kapal

LWT : 300 ton

DWT : 445 ton

Koefisien blok : 0,43

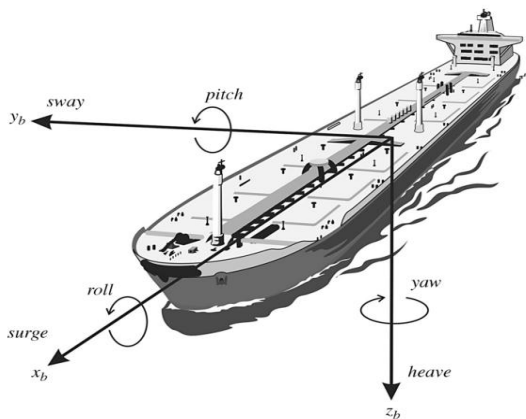
*Rudder area* : 1,72 m<sup>2</sup>

*Longitudinal Center of Gravity* (LCG) : 23,27 meter

*Vertical Center of Gravity* (VCG) : 3,975 meter

## 2.2 Model Sistem Dinamika Kapal

Gerak yang dialami oleh kapal terbagi menjadi gerak translasi dan gerak rotasi. Gerak translasi, didalamnya terdapat gerak *surge* (x), gerak *sway* (y) dan gerak *heave* (z). Gerak *surge* yang searah dengan sumbu x, gerak *sway* yang searah dengan sumbu y, dan gerak *heave* yang searah dengan sumbu z kapal. Gerak rotasi, didalamnya terdapat gerak *roll* ( $\phi$ ), gerak *pitch* ( $\theta$ ), dan gerak *yaw* ( $\psi$ ). Gerak rotasi terhadap sumbu x kapal (*roll*), gerak rotasi terhadap sumbu y kapal (*pitch*) dan gerak rotasi terhadap sumbu z (*yaw*). Ilustrasi gerak yang dialami kapal ditunjukkan pada gambar 2.2 dengan notasi yang digunakan ditunjukkan pada tabel 2.1 berikut.



**Gambar 2.2** Gerak yang terjadi pada kapal (Fossen, 2011)

**Tabel 2.1** Notasi yang digunakan (Fossen, 2011).

DOF		Gaya dan momen	Kecepatan linear dan angular	Posisi dan sudut euler
1	Gerakan pada sumbu x ( <i>surge</i> )	X	U	x
2	Gerakan pada sumbu y ( <i>sway</i> )	Y	V	y
3	Gerakan pada sumbu z ( <i>heave</i> )	Z	W	z
4	Rotasi pada sumbu x ( <i>roll</i> )	K	P	$\phi$
5	Rotasi pada sumbu y ( <i>pitch</i> )	M	Q	$\theta$
6	Rotasi pada sumbu z ( <i>yaw</i> )	N	R	$\psi$

Pemodelan matematis *rigid-body dynamics* dari masing gerak kapal diperoleh dari penerapan persamaan gerak *Newtonian-*

*Langrangian* yang dapat dituliskan seperti di bawah (Fossen, 1994).

$$X = m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \quad (2.1)$$

$$Y = m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] \quad (2.2)$$

$$Z = m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rp + \dot{p})] \quad (2.3)$$

$$K = I_x \dot{p}(I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \quad (2.4)$$

$$M = I_y \dot{q}(I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} +$$

$$m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \quad (2.5)$$

$$N = I_z \dot{r}(I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (p^2 - r^2)I_{xy} + (rp - \dot{p})I_{zx} +$$

$$m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \quad (2.6)$$

### 2.2.1 Persamaan Sistem Kemudi Kapal

Persamaan matematis kemudi kapal diberikan dalam bentuk sebagai berikut (Fossen, 1994):

$$M_{\dot{v}} + D_v + g(\eta) = b_{\delta} + \tau_{wave} \quad (2.7)$$

Dengan M adalah bentuk matriks inersia dan D adalah bentuk matriks *damping*. Adapun  $g(\eta)$  merupakan gaya pembalik (*restoring forces*) dan  $v$  merupakan vektor kecepatan. Dalam perilaku *seakeeping*, vektor yang digunakan dalam kemudi kapal adalah linearisasi momen dan gaya dari *sway*, *yaw* dan *roll* yang digunakan untuk menjaga stabilitas kapal, yang kemudian didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$v = [v, p, r]^T \quad (2.8)$$

Dengan beberapa asumsi yang harus dipenuhi, antara lain:

1. Distribusi massa homogen dan bidang  $xz$  simetris ( $I_{xy} = I_{yz} = 0$ ).
2. *Surge*, *heave* dan *pitch* diabaikan ( $u = w = q = \dot{u} = \dot{w} = \dot{q}$ ).

Berdasarkan asumsi yang diatas, diperoleh persamaan seperti berikut:

$$Sway : m(\dot{v} + x_G \dot{r} - z_G \dot{p}) = Y \quad (2.9)$$

$$Yaw : I_z \dot{r} + m x_G \dot{v} = N \quad (2.10)$$

$$Roll : I_x \dot{p} + m x_G \dot{v} = K - \Delta W G M_T \quad (2.11)$$

Parameter  $m$  merupakan massa kapal,  $v$ ,  $p$  serta  $r$  adalah kecepatan *sway*, *yaw* dan *roll* dari kapal,  $I_x$  adalah momen inersia terhadap sumbu  $x$  serta  $X_G$  dan  $Z_G$  adalah pusat massa kapal pada sumbu  $X$  dan  $Z$ .

Berdasarkan tinjauan gerak kapal yang dan asumsi yang berlaku sebelumnya maka matriks kemudi kapal dinyatakan sebagai berikut:

$$M_{\dot{v}} + D_v + g(\eta) = b_{\delta} + \tau_{wave} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -mZ_G - Y_{\dot{p}} & mX_G - Y_{\dot{r}} \\ -mZ_G - Y_{\dot{p}} & I_x - K_{\dot{p}} & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & -Y_{\dot{r}} \\ -Y_p & -K_p & 0 \\ 0 & 0 & -N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \overline{GM}_T & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ K_{\delta} \\ N_{\delta} \end{bmatrix} \delta_R + \tau_{wave} \quad (2.12)$$

Parameter yang terdapat pada matriks di atas merupakan parameter hidrodinamika kapal dengan penjelasan:  $Y_{\dot{v}}$  adalah turunan gaya *sway* terhadap  $\dot{v}$ ,  $Y_{\dot{p}}$  adalah turunan gaya *sway* terhadap  $\dot{p}$ ,  $K_{\dot{p}}$  adalah turunan momen *roll* terhadap  $\dot{p}$ ,  $N_{\dot{r}}$  adalah momen gaya *yaw* terhadap  $\dot{r}$ ,  $I_x$  adalah momen inersia terhadap sumbu  $x$  dan  $I_z$  adalah momen inersia terhadap sumbu  $z$ .

Berdasarkan linearisasi model Christensen – Blanke, maka diperoleh *nonlinear steering and rolling* yang ditunjukkan pada persamaan 2.3 di bawah (Fossen, 1994):

$$\begin{bmatrix} m - Y_v & -mZ_G - Y_p & mX_G - Y_r \\ -mZ_G - Y_p & I_x - K_p & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & -Y_r \\ -Y_p & -(K_p + GM_T) & 0 \\ 0 & 0 & -N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Tinjauan gerak *roll* pada kapal dinyatakan dalam bentuk fungsi transfer, yang ditunjukkan pada persamaan berikut (Fossen, 1994).

$$\phi(s) = \frac{K_\delta \delta(s) + K_\alpha \alpha(s) - K_r r(s)}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.14)$$

Menggunakan asumsi  $K_\delta \delta(s)$  dan  $K_\alpha \alpha(s)$  bernilai konstan, dengan  $K_r r(s)$  merupakan momen *roll* kapal, diperoleh fungsi dinamika *roll* kapal sebagai berikut:

$$\frac{\phi(s)}{M(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.15)$$

Dengan menggunakan pendekatan persamaan hidrodinamika diperoleh turunan koefisien hidrodinamika *non-dimentional* yang dinormalisasi dari *Prime System I* (Lewis, 1989).

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,16 \frac{C_{BB}}{T} - 5,1 \quad (2.16)$$

$$\frac{-Y'_p}{\pi(T/L)^2} = 1 - 0,4 \frac{C_{BB}}{T} \quad (2.17)$$

$$\frac{-Y'_p}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2,2 \frac{B}{L} - 0,08 \frac{B}{T} \quad (2.18)$$

$$\frac{-Y'_p}{\pi(T/L)^2} = 0,67 \frac{B}{L} - 0,08 \left(\frac{B}{T}\right)^2 \quad (2.19)$$

$$\frac{-K'_p}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{4} + 0,039 \frac{B}{T} - 0,56 \frac{B}{L} \quad (2.20)$$

$$\frac{-k'_p}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0,017 \frac{C_{BB}}{T} - 0,33 \frac{B}{L} \quad (2.21)$$

$$Y_\delta = \rho \frac{\pi A_\delta}{4 LT} \quad (2.22)$$

$$N_\delta = -\frac{1}{2} Y_\delta \quad (2.23)$$

**Tabel 2.2** Variabel normalisasi *Prime-System I* (Fossen, 1994).

<i>Unit</i>	<i>Prime System I</i>
<i>Length</i>	L
<i>Mass</i>	$\frac{1}{2}\rho L^3$
<i>Inertia Moment</i>	$\frac{1}{2}\rho L^5$
<i>Time</i>	L/U
<i>Reference Area</i>	L <sup>2</sup>
<i>Position</i>	L
<i>Angle</i>	1
<i>Linear Velocity</i>	U
<i>Angular Velocity</i>	U/L
<i>Linear Acceleration</i>	U <sup>2</sup> /L
<i>Angular Acceleration</i>	U <sup>2</sup> /L <sup>2</sup>
<i>Force</i>	$\frac{1}{2}\rho U^2 L^2$
<i>Moment</i>	$\frac{1}{2}\rho U^2 L^3$

### 2.3 Gangguan Gelombang

Saat kapal beroperasi di laut, kapal mengalami gaya gangguan dari lingkungan yang mempengaruhi kerja dari kapal. Gangguan yang terjadi yaitu arus, angin dan gelombang laut (Fossen, 1994). Gangguan yang terjadi memiliki pengaruh pada kecepatan *propeller* kapal dan arah gerak *rudder* kapal.

Gangguan gelombang berdasarkan frekuensinya digolongkan menjadi gelombang frekuensi rendah dan gelombang frekuensi tinggi. Berdasarkan ketinggian signifikan, gelombang dibagi menjadi sepuluh keadaan yang kemudian dinyatakan dengan *sea state* dengan penjelasan pada tabel 2.3.

**Tabel 2.3** *Sea State Description* (Price & Bishop, 1974).

<i>Sea State code</i>	<i>Description of Sea</i>	<i>Wave Height observed (m)</i>	<i>Percentage Probability</i>		
			<i>World Wide</i>	<i>North Atlantic</i>	<i>Northern North Atlantic</i>
0	<i>Calm (glassy)</i>	0			
1	<i>Calm (rippled)</i>	0 – 0,1	11,248	8.310	6,062
2	<i>Smooth (wavelets)</i>	0,1 – 0,5			
3	<i>Slight</i>	0,5 – 1,25	31,685	28,199	21,568
4	<i>Moderate</i>	1,25 – 2,5	40,194	42,027	40,991
5	<i>Rough</i>	2,5 – 4,0	12,800	15,443	21,238
6	<i>Very Rough</i>	4,0 – 6,0	3,025	4,294	7,010
7	<i>High</i>	6,0 – 9,0	0,926	1,497	2,693
8	<i>Very High</i>	9,0 – 14,0	0,119	0,226	0,435
9	<i>Phenomenal</i>	> 14,0	0,001	0,002	0,003

Tabel 2.3 di atas menjelaskan pembagian gelombang laut berdasarkan ketinggiannya. Selain itu, dijelaskan peluang terjadinya ketinggian gelombang pada wilayah laut yang tersebar.

### 2.3.1 Gelombang Frekuensi Rendah

Gangguan gelombang dengan frekuensi rendah dapat dimodelkan dengan gaya *coriolis* dengan nonlinear damping diabaikan. Model dinamika posisi kapal dalam frekuensi rendah ditunjukkan dengan model linear *sway*, *roll* dan *yaw* sebagai berikut (Fossen, 1994):



$$\mathbf{M}\dot{v}_L + \mathbf{D}(v_L - v_c) = \mathbf{b}_\delta \quad (2.24)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -mZ_G - Y_{\dot{p}} & 0 \\ -mZ_G - Y_{\dot{p}} & I_x - K_{\dot{p}} & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & 0 \\ -Y_p & -(K_p + \overline{GM}_T) & 0 \\ 0 & 0 & -N_r \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

dengan  $\psi_d = 0$  diperoleh:

$$\dot{\eta}_L = v_L \quad (2.27)$$

dimana  $\dot{\eta}_L = [v_L \ p_L \ r_L]^T$ . Pendekatan ini diterapkan pada model kontrol DP karena  $\psi_L - \psi_d$  sangat kecil, sehingga dapat dituliskan:

$$\dot{x}_L = A_L x_L + B_L \delta_L + E_L w_L \quad (2.28)$$

dimana

$$\dot{x}_L = [v_L, \phi_L, \psi_L]^T \text{ dan} \\ A_L = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & -M^{-1}D \end{bmatrix}, B_L = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}b \end{bmatrix}, E_L = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

### 2.3.2 Gelombang Frekuensi Tinggi

Gelombang frekuensi tinggi, digunakan persamaan transfer orde dua, yaitu (Fossen, 2011):

$$h(s) = \frac{K\omega s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2.30)$$

$\omega_0$  = frekuensi gelombang (modal frekuensi), dengan:

$$\omega_0 = 0,4 \sqrt{g/H} \quad (2.31)$$

$\xi$  = *damping coefficient*;

$K\omega_0$  = *gain constant*.

Selain itu, untuk kapal yang bergerak dengan kecepatan  $U$ , frekuensi gelombang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\omega_e(U, \omega_0, \beta) = \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} U \cos \beta \quad (2.32)$$

## 2.4 Seakeeping

*Seakeeping* merupakan mempelajari tingkah laku kapal ketika berada didalam gelombang laut dengan mempertahankan kecepatan, arah serta jalur kapal untuk tetap sama (konstan). (Perez, 2005).

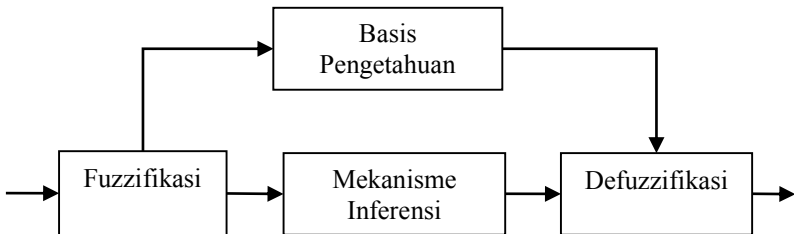
## 2.5 Logika Fuzzy

Logika *Fuzzy* adalah konsep logika yang dikenalkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965 sebagai jawaban atas kekurangan dari logika klasik yang menjelaskan bahwa keberadaan suatu elemen hanya memiliki 2 kemungkinan keanggotaan. Kedua kemungkinan keanggotaan memiliki nilai yang saling berlawanan dan bertolak belakang, misal ya serta tidak atau benar dan tidak.

Lotfi A. Zadeh memodifikasi himpunan keanggotaan logika klasik dimana masing masing anggotanya diubah dengan memiliki derajat keanggotaan yang bernilai kontinu antara 0 sampai 1 dan menyebutnya himpunan kabur (*fuzzy set*) (Kusumadewi, 2003).

### 2.5.1 Struktur Dasar Logika Fuzzy

Dalam melakukan perancangan logika *fuzzy*, dilakukan dengan melalui tiga tahap seperti gambar 2.3 dengan penjelasannya di bawah, yaitu;



**Gambar 2.3** Skema *Fuzzy* (Kusumadewi, 2003)

1. Fuzzifikasi  
Pada tahap ini dilakukan pemberian sinyal masukan yang masih berupa nilai *crisp* ditransformasikan ke dalam bentuk *fuzzy* dengan operator fuzzifikasi.
2. Mekanisme Inferensi  
Di mekanisme inferensi, sinyal masukan yang sudah ditransformasikan ke dalam bentuk *fuzzy* digolongkan berdasarkan dengan basis data dan aturan yang telah ditentukan dalam perangkat aturan pengendalian.
3. Defuzzifikasi  
Di tahap ini sinyal keluaran yang berupa himpunan *fuzzy* diubah kembali menjadi bentuk himpunan *crisp*. Keluaran sinyal ini kemudian dijadikan masukan aksi oleh sistem kendali logika *fuzzy*.

### 2.5.2 Fungsi Keanggotaan *Fuzzy*

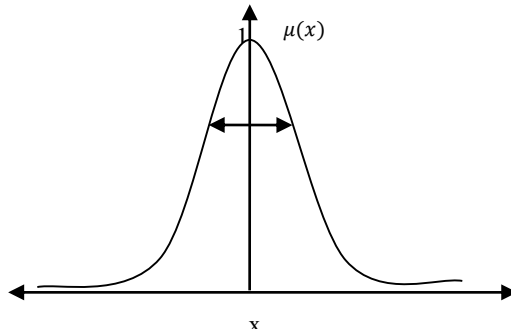
Dalam tahap fuzzifikasi, masukan yang masih berupa himpunan *crisp* diubah menjadi himpunan *fuzzy*, dengan derajat keanggotaan yang beragam antara 0 dan 1. Sesuai dengan fungsi keanggotaan yang telah disusun maka dari nilai masukan tersebut menjadi informasi *fuzzy* yang berguna untuk proses pengolahan *fuzzy*.

Keanggotaan dalam himpunan *fuzzy* mempunyai bentuk yaitu;

### Fungsi Gaussian

$$\mu_A(u) = \exp \left[ -\frac{(u-x)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2.33)$$

Fungsi keanggotaan *Gaussian* memiliki bentuk pola *Gaussian* yang mirip dengan bentuk lonceng. Pada fungsi keanggotaan *Gaussian* hanya terdapat satu titik yang memiliki nilai keanggotaan satu. Fungsi keanggotaan *Gaussian* ditunjukkan pada gambar 2.4 berikut.

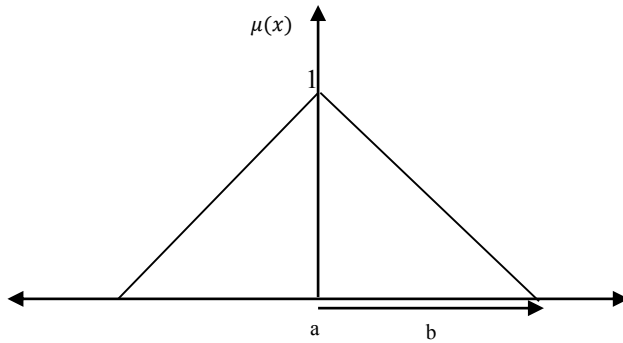


**Gambar 2.4** Bentuk fungsi keanggotaan *Gaussian* (Kusumadewi, 2003).

### Fungsi Segitiga

$$\mu_A(u) = 1 - \frac{\sqrt{(u-a)^2}}{b} \quad (2.34)$$

Fungsi keanggotaan segitiga ditandai dengan adanya tiga parameter yang menentukan koordinat x dari tiga sudut. Bentuk fungsi keanggotaan segitiga ditunjukkan pada gambar 2.5 di bawah.

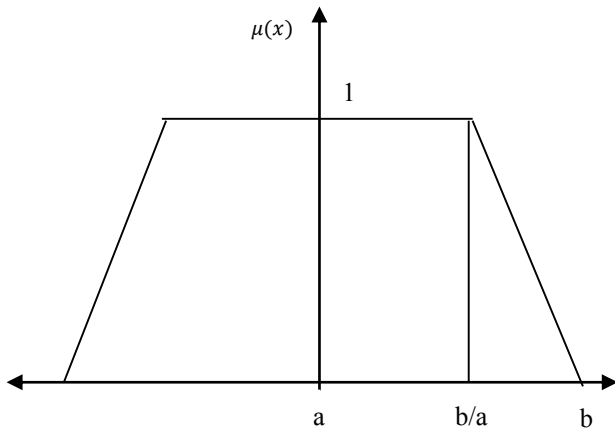


**Gambar 2.5** Bentuk fungsi keanggotaan Segitiga  
(Kusumadewi, 2003).

### Fungsi Trapesium

$$\mu_A(u) = \begin{cases} 1 & \dots \dots \dots; 0 \geq (u - a) \leq \frac{b}{a} \\ 2 - 2\frac{\sqrt{(u-a)^2}}{b} & \dots; \frac{b}{2} \leq (u - a) \leq b \end{cases} \quad (2.35)$$

Fungsi keanggotaan trapesium secara bentuk menyerupai dengan fungsi keanggotaan segitiga. Namun, hal yang membedakannya dengan fungsi keanggotaan segitiga ialah pada fungsi trapesium terdapat beberapa titik yang memiliki nilai keanggotaan satu. Bentuk fungsi keanggotaan trapesium ditunjukkan pada gambar 2.6 berikut.

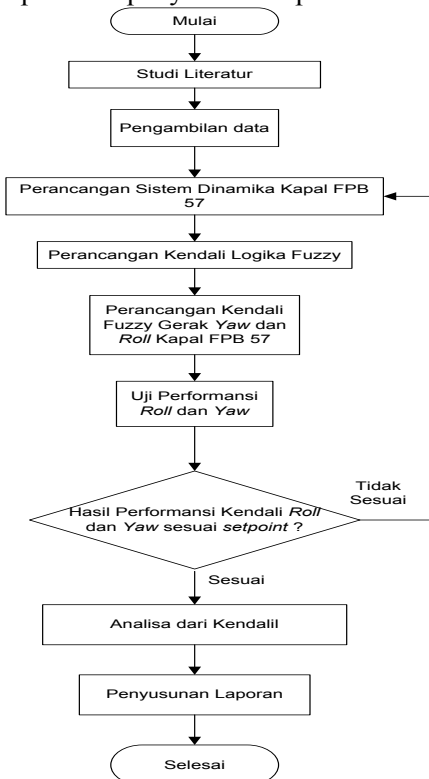


**Gambar 2.6** Bentuk fungsi keanggotaan Trapesium.  
(Kusumadewi, 2003).

### BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian, diperlukan alur pelaksanaan kegiatan agar penelitian dapat dilakukan secara teratur dan sistematis dalam mencapai tujuan dari penelitian. Penelitian tentang laku kestabilan *seakeeping* pada kapal FPB 57 ini dimulai dari tinjauan pustaka, pengambilan data, pemodelan sistem dinamik kapal, perancangan kendali *fuzzy* kapal serta penyusunan laporan.



**Gambar 3.1** Diagram Alir Tugas Akhir

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan perhitungan serta simulasi pemodelan dengan menggunakan perangkat lunak

MatLab/ Simulink R2009b. Sesuai dengan judul, penelitian ini merancang pemodelan sistem kontrol yang menggunakan metode *fuzzy*. Metode *fuzzy* dipilih dikarenakan sistem yang dikontrol tidak linier dengan variabel yang beragam. Adapun rincian dari pelaksanaan penelitian yang sesuai dengan diagram alir pada gambar 3.1 adalah sebagai berikut:

1. Pelaksanaan penelitian dimulai dengan melakukan tinjauan pustaka mengenai sistem kontrol, data spesifikasi Kapal FPB 57 dengan sistem kontrol serta sistem navigasi termasuk di dalamnya. Hal ini menunjang dalam penentuan stabilitas dinamika kapal yang merupakan fokus utama *seakeeping*. Adapun pustaka yang digunakan sebagai bahan rujukan penelitian ini dirincikan pada tabel 3.1 di bawah ini

**Tabel 3.1** Daftar Acuan Pustaka Yang Digunakan

No	Tahun	Penulis	Judul	Keterangan
1	2012	Fang, M. C., Lin, Y.H	<i>Applying the PD Controller on The Roll Reduction and Track Keeping for The Ship Advancing in Waves</i>	Pada karya ini dibahas penentuan metode kontrol berbasis PD untuk pengurangan gerak <i>roll</i> kapal dalam jalur yang ditentukan. Pemodelan matematis didasarkan <i>seakeeping</i> dan maneuvering. Aktuator yang digunakan adalah <i>rudder</i> dan <i>fin</i> .



**Lanjutan Tabel 3.1**

<b>No</b>	<b>Tahun</b>	<b>Penulis</b>	<b>Judul</b>	<b>Keterangan</b>
2	2005	Perez, T.	<i>A Review of Geometrical Aspects of Ship Motion in Maneuvering and Seakeeping</i>	Pada karya ini, dibahas tinjauan geometris dari gerakan kapal yang umumnya digunakan dalam bahasan <i>seakeeping</i> dan <i>maneuvering</i> .
3	2001	Riola, J. M., Esteban, S., Girón-Sierra, J. M., & Aranda, J.	<i>Motion and seasickness of fast warships</i>	Pada karya ini dibahas aspek gerakan kapal, gelombang dan pengaruhnya pada kenyamanan manusia penggunaannya.
4	2010	Tomera, M.	<i>Nonlinear Controller Design Of A Ship Autopilot</i>	Pada karya ini dibahas perancangan kontrol untuk autopilot yang sesuai berdasarkan metode <i>sliding mode controller</i> (SMC).
5	2003	Velagic, J., Vukic, Z., & Omerdic, E.	<i>Adaptive fuzzy ship autopilot for track-keeping</i>	Pada karya ini dibahas penerapan <i>Fuzzy Gain Controller</i> (FGC) pada <i>ship track-keeping</i> .

2. Pengambilan data masukan yang digunakan untuk merancang simulasi kestabilan serta *seakeeping* dari Kapal FPB 57. Data yang diambil adalah spesifikasi koefisien hidrodinamika yang diperoleh dari spesifikasi fisik yang dimiliki oleh kapal, yaitu : panjang (L), lebar (B), kedalaman (T), koefisien blok (CB), lebar *rudder* dan dimensi *fin stabilizer*. Data spesifikasi ini digunakan sebagai penentu *crisp* masukan yang berupa jarak, *error* sudut sway, *roll* dan *yaw*.
3. Pemodelan simulasi menggunakan MatLab berdasarkan data spesifikasi FPB 57 yang telah diperoleh yang kemudian dilakukan pengujian. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kesesuaian model yang telah dirancang. Setelah pemodelan Kapal FPB 57 dinilai sesuai, dilakukan perancangan sistem kendali *fuzzy* FPB 57.
4. Pengujian dilakukan terhadap sistem kendali *fuzzy* dengan diberikan gangguan. Gangguan yang diberikan adalah gelombang laut dengan beragam ketinggian. Ketinggian gelombang laut yang digunakan beragam, dimulai dengan *sea state* 1 hingga *sea state* 4.
5. Analisis performansi sistem kendali dilakukan setelah mendapatkan hasil respon dari simulasi yang disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak MatLab. Dari hasil respon yang dihasilkan, dilakukan peninjauan respon sesuai dengan ketinggian ombak. Hasil respon dianalisis untuk memperoleh data performansi FPB 57 yang sesuai dengan kriteria *seakeeping*.
6. Penyusunan laporan penelitian dilakukan untuk memberikan informasi yang komprehensif mengenai penelitian yang telah dilakukan.

### 3.1 Studi Literatur

Tahap studi literatur dipelajari model dinamika serta kendali kapal FPB 57 sesuai dengan tema penelitian. Selain itu, dilakukan pencarian dan tinjauan akan penelitian sebelumnya yang berkaitan

dengan kontrol kapal, khususnya perilaku dan perancangan kontrol kapal dengan menggunakan metode logika *Fuzzy*

### 3.2 Pengambilan Data

Data yang diperlukan pada penelitian ini adalah data spesifikasi kapal FPB 57. Data spesifikasi kapal FPB 57 diperoleh dari PT. PAL INDONESIA. Data spesifikasi kapal FPB 57 adalah sebagai berikut:

Panjang

LOA : 58,1 meter

LWL : 54,4 meter

Lebar (*Beam*) : 7,62 meter

Tinggi (*Height*) : 4,75 meter

Sarat (*Draught*) : 2,95 meter

Kecepatan Kapal : 28 knot = 14,404 m/s

Massa Kapal

LWT : 300 ton

DWT : 445 ton

Koefisien blok : 0,43

*Rudder area* : 1,72 m<sup>2</sup>

*Longitudinal Center of Gravity* (LCG) : 23,27 meter

*Vertical Center of Gravity* (VCG) : 3,975 meter

### 3.3 Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem dinamika kapal FPB 57 dilakukan dengan memodelkan sistem ke dalam bentuk matematis. Pemodelan matematis dilakukan dengan menggunakan pendekatan Christensen – Blanke yang kemudian dilinierisasi menjadi bentuk model Nomoto. Variabel yang digunakan dalam pemodelan diperoleh dari regresi tak berdimensi oleh Clarke sesuai dengan persamaan 2.16 – 2.22 (Lewis, 1989). Berikut adalah nilai variabel hidrodinamika yang digunakan:

$$Y'_p = 0,0036$$

$$Y'_v = -0,0099$$

$$\begin{aligned}
Y'_r &= -0,0006 \\
K'_p &= -0,0007 \\
K'_v &= -0,0004 \\
Y'_v &= -0,0134 \\
Y'_p &= -0,0055 \\
Y'_r &= 0,0036 \\
K'_p &= 0,0021 \\
K'_v &= -0,0058 \\
I'_r &= 0,0002 \\
I'_x &= 0,0002 \\
Y'_\delta &= 0,0084 \\
N'_\delta &= -0,0042 \\
K'_\delta &= -0,7568
\end{aligned}$$

Nilai dari variabel hidrodinamika di atas diturunkan dari persamaan hidrodinamika Clarke. Nilai variabel hidrodinamika di atas disusun sesuai parameter kendali kapal yakni koefisien pada matriks M dan D sesuai dengan persamaan 2.12, dengan koefisien hidrodinamika yang ditunjukkan pada persamaan 3.1 berikut:

$$\begin{aligned}
&\begin{bmatrix} m - Y_v & -mZ_G - Y_{\dot{p}} & mX_G - Y_r \\ -mZ_G - Y_{\dot{p}} & I_x - K_{\dot{p}} & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & -Y_r \\ -Y_p & -K_p & 0 \\ 0 & 0 & -N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ K_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \delta_R \\
&\begin{bmatrix} 0,0099 & -0,0036 & -0,0006 \\ -0,0036 & 0,0076 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0080 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,0134 & 0,0055 & 0,0006 \\ 0,0055 & -0,0021 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0025 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \end{bmatrix} = \\
&\begin{bmatrix} 0 \\ -0,7568 \\ -0,0042 \end{bmatrix} \delta_R \tag{3.1}
\end{aligned}$$

Dengan menggunakan sifat operasi invers matriks, diperoleh matriks *state space* pada persamaan 3.2 berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,9754 & -0,5523 & -0,0969 \\ -1,6649 & 0,0088 & -0,0465 \\ 0 & 0 & -0,3131 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,4415 \\ 1,1985 \\ 0,0005 \end{bmatrix} \delta_R \tag{3.2}$$

Bentuk koefisien matriks *state space* frekuensi rendah dengan variable *state space*  $\dot{x}_L = [y_L, \phi_L, \psi_L]^T$ , ditunjukkan pada persamaan 3.3 – 3.5 berikut.

$$A_L = \begin{bmatrix} -1,9754 & -0,5523 & -0,0969 \\ -1,6649 & 0,0088 & -0,0465 \\ 0 & 0 & -0,3131 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$B_L = \begin{bmatrix} 0,4415 \\ 1,1985 \\ 0,0005 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$E_L = \begin{bmatrix} 121,5899 & 58,3378 & 9,0852 \\ 58,3378 & 158,3681 & 4,3590 \\ 0 & 0 & 124,5330 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Pemodelan frekuensi tinggi dilakukan sesuai dengan data teknis dari kapal FPB 57, dimana sesuai dengan data teknis kapal FPB 57 mampu beroperasi di laut yang memiliki ketinggian gelombang hingga *sea state* 4. Adapun pemodelan frekuensi tinggi kapal ditunjukkan pada persamaan 3.6 (Fossen, 1994):

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_H \\ \dot{\phi}_H \\ \dot{\psi}_H \\ \dot{\xi}_y \\ \dot{\xi}_\phi \\ \dot{\xi}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\zeta\omega_0 & 0 & 0 & -\omega_0^2 & 0 & 0 \\ 0 & -2\zeta\omega_0 & 0 & 0 & -\omega_0^2 & 0 \\ 0 & 0 & -2\zeta\omega_0 & 0 & 0 & -\omega_0^2 \\ & & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_H \\ \phi_H \\ \psi_H \\ \xi_y \\ \xi_\phi \\ \xi_\psi \end{bmatrix} + K_w \begin{bmatrix} w_y \\ w_\phi \\ w_\psi \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Pada penelitian ini, variabel gangguan yang digunakan adalah ketinggian gelombang saat kapal FPB 57 dioperasikan di laut. Sesuai dengan data teknis dari kapal FPB 57 menyebutkan bahwa kapal dapat beroperasi di laut dengan ketinggian gelombang hingga *sea state* 4 atau 2,5 meter (Tabel 2.3).

- Pemodelan gelombang frekuensi rendah *sea state* 1 ( $H = 0,1$  m).

Dengan  $\omega_0 = 0,4 \sqrt{\frac{g}{H_s}}$ ,  $\zeta = 0,1$ , dan  $K_w = 2\zeta\omega_0\tau_\omega$ . Dengan nilai  $g = 9,8$  m/s,  $H = 0,1$  meter (Tabel 2.3),  $\tau_\omega = 3,16$  didapatkan model gelombang laut yang ditunjukkan pada persamaan 3.7:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_H \\ \dot{\phi}_H \\ \dot{\psi}_H \\ \dot{\xi}_y \\ \dot{\xi}_\phi \\ \dot{\xi}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,7919 & 0 & 0 & -15,68 & 0 & 0 \\ 0 & -0,7919 & 0 & 0 & -15,68 & 0 \\ 0 & 0 & -0,7919 & 0 & 0 & -15,68 \\ & & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \\ & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_H \\ \phi_H \\ \psi_H \\ \xi_y \\ \xi_\phi \\ \xi_\psi \end{bmatrix} + 2,5026 \begin{bmatrix} w_y \\ w_\phi \\ w_\psi \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Dari pemodelan gangguan frekuensi rendah dan frekuensi tinggi diatas dilakukan pemisahan terhadap pemodelan frekuensi rendah dan pemodelan frekuensi tinggi. Pemisahan dilakukan dengan penyesuaian besar gangguan pada frekuensi tinggi sebagaimana ditunjukkan dengan matriks dibawah ini (Fossen, 1994):

- Untuk ketinggian gelombang *sea state* 1 ( $H = 0,1$  meter), diperoleh persamaan 3.8 – 3.10 berikut.

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_L & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -1,9754 & -0,5523 & -0,0969 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -1,6649 & 0,0088 & -0,0465 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 & -0,3131 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_H \\ \phi_H \\ \psi_H \\ \xi_y \\ \xi_\phi \\ \xi_\psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ 0 & 0 & -15,68 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0,7919 & 0 & 0 \\ 0 & -0,7919 & 0 \\ 0 & 0 & -15,68 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_y \\ w_\phi \\ w_\psi \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$B = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_L \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0,4415 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 1,1985 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0,0005 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$E = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ 121,589 & 58,3378 & 9,0852 & & \\ 58,3788 & 158,368 & 4,3590 & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ 0 & 0 & 124,533 & & \\ & & & 0 & 0 & 2,5026 \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & 0 & 0 & 2,5026 \\ & & & 0 & 0 & 2,5026 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & & & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Selain dalam bentuk *state space*, dilakukan pemodelan dalam bentuk fungsi transfer untuk gerak *roll* yang dinyatakan dalam bentuk sebagai berikut (Fossen, 1994):

$$\frac{\phi(s)}{M(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.11)$$

Dimana:  $\omega_n$  = Frekuensi natural kapal

$\xi_n$  = Koefisien redaman kapal.

**Tabel 3.2** Periode *Roll* Kapal (Battacharya, 1978)

Tipe Kapal	T $\phi$ (sekon)
<i>Passenger</i>	20 – 25
<i>Cargo Passenger</i>	10,5 – 14,5
<i>Cargo</i>	9 – 13
<i>Tanker</i>	5,5 – 7
<i>Fishing Boat</i>	9 – 11,5
<i>Battle Ship</i>	14,5 – 17
<i>Cruiser</i>	12 – 13
<i>Destroyer</i>	9 – 9,5
<i>Torpedo Boat</i>	7 – 7,5

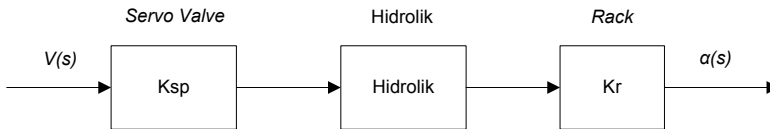
Berdasarkan tabel 3.2 di atas, kapal FPB 57 yang tergolong *battle ship* yang memiliki periode *rolling* sebesar 14,5 sekon. Besar nilai frekuensi natural dari kapal FPB 57 diperoleh dengan persamaan 3.12 berikut.

$$\omega_n = \frac{2\pi}{14,5} = 0,433 \quad (3.12)$$

Dengan asumsi koefisien redaman ( $\xi$ ) = 0,1, didapatkan fungsi transfer gerak *roll* FPB 57 berikut.

$$\frac{\phi(s)}{M(s)} = \frac{1}{s^2 + 2(0,1)(0,433) + (.433)^2} = \frac{1}{s^2 + 0,0866s + 0,1875} \quad (3.13)$$

Aktuator yang digunakan untuk mengendalikan gerak *roll* pada kapal FPB 57 adalah *fin stabilizer*. Sistem *fin stabilizer* terdiri dari *fin*, *piston motor* dan *servo valve*. Blok diagram dari *fin stabilizer* ditunjukkan pada gambar 3.2 berikut.



**Gambar 3.2** Diagram blok *fin stabilizer*.

Spesifikasi *fin* yang digunakan pada kapal FPB 57 adalah sebagai berikut;

$A_f$ (luas penampang <i>fin</i> )	: 1,72 m <sup>2</sup>
Massa jenis air laut	: 1014 kg/m <sup>3</sup>
Koefisien <i>Lift</i>	: 6,26
Sudut yang dibentuk <i>fin stabilizer</i> terhadap <i>water line</i>	: 60°

*Fin* pada kapal FPB 57 digerakkan dengan menggunakan piston. Pada *piston*, diatur seberapa besar sudut yang dibentuk *fin* untuk menstabilkan gerakan *roll* kapal FPB 57. Spesifikasi dari piston adalah sebagai berikut :

Luas permukaan hidrolik	: 112,5 cm <sup>2</sup>
<i>Volume displacement</i>	: 5390 – 5890 cm <sup>3</sup>
Debit	: 20,2 lt/menit
<i>Full stroking time (Tv)</i>	: 0,26 sekon
<i>Constant Ratio Time Piston (Rv)</i>	: 0,3

Fungsi transfer untuk *piston* dengan data yang telah tersedia diatas adalah sebagai berikut (Ogata, 1992) :

$$F(s) = \frac{K}{(Ts+1)s} \quad (3.14)$$



Dimana:

$$K = \frac{1}{\text{Luas Piston}} \quad (3.15)$$

$$K = \frac{1}{112.5 \times 10^{-4}} = 88,89 \, m^2 \quad (3.16)$$

Dengan menentukan besar *time constant* adalah sebagai berikut :

$$Ts = Tv(\Delta v + Rv) \quad (3.17)$$

$$Ts = 0,26 \left( \left( \frac{5890 - 5390}{5890} \right) + 0,3 \right) \quad (3.18)$$

$$Ts = 0,26(0,085 + 0,3) = 0,1 \, \text{sekon} \quad (3.19)$$

Maka;

$$K(s) = \frac{K}{(Ts+1)s} = \frac{88,89}{s(0,1+1)} \quad (3.20)$$

Fungsi transfer *servo valve* adalah sebagai berikut (Ogata, 1992):

$$\frac{x(s)}{v(s)} = Ksp \quad (3.21)$$

$$Ksp = 0,0001 \quad (3.22)$$

Selain *fin* dan *servo valve*, diperlukan pengubah yang nantinya mengubah gerakan sudut (aksial) menjadi gerakan rotasi. Konversi ini dilakukan oleh *rack* dan *pinion*. Konversi ini dinyatakan dalam bentuk matematis sebagai berikut:

$$Y = r \times \alpha \quad (3.23)$$

Dimana:  $Y$  = besar pergerakan *piston* (m)

$r$  = jari jari *pinion*

$\alpha$  = sudut yang dibentuk oleh *fin*

Fungsi transfer gerak aksial menjadi gerak rotasi oleh *rack* dan *pinion* adalah sebagai berikut:

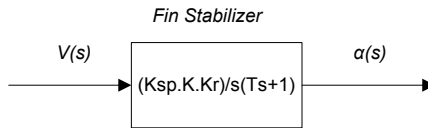
$$\frac{\alpha(s)}{y(s)} = Kr \quad (3.24)$$

$$\text{Dimana } Kr = \frac{1}{r} \quad (3.25)$$

$$r : 12,32 \text{ cm}$$

$$Kr = 8,12m^{-1}$$

Berdasarkan pada gambar 3.2 diatas, blok diagram *fin stabilizer* disederhanakan yang ditunjukkan pada gambar 3.3 berikut.



**Gambar 3.3** Diagram blok *fin stabilizer* sederhana.

Fungsi transfer dari *fin stabilizer* sebagai berikut:

$$H(s) = \frac{0,087}{s(0,1+1)} \quad (3.26)$$

### 3.4 Pemodelan Gangguan Gelombang

Pemodelan gangguan gelombang umumnya dinyatakan dalam bentuk fungsi transfer orde-2 yang didasarkan model pendekatan gelombang oleh Pierson dan Moskowitz (1963) yang dikutip dalam Fossen (2011) (Fossen, 2011):

$$h(s) = \frac{K_w s}{s^2 + 2\zeta\omega_o s + \omega_o^2} \quad (3.27)$$

Sesuai dengan data teknis kapal FPB 57, kapal dapat beroperasi di laut dengan ketinggian gelombang dari *sea state* 1 hingga *sea state* 4, maka;

Pemodelan gangguan gelombang pada *sea state* 1 ( $H = 0,1$  meter):

$$h(s) = \frac{2,5025s}{s^2 + 0,7919s + 15,68} \quad (3.28)$$

Pemodelan gangguan gelombang pada *sea state* 2 ( $H = 0,5$  meter):

$$h(s) = \frac{1,1192s}{s^2 + 0,3541s + 3,136} \quad (3.29)$$

Pemodelan gangguan gelombang pada *sea state* 3 ( $H = 1,25$  meter):

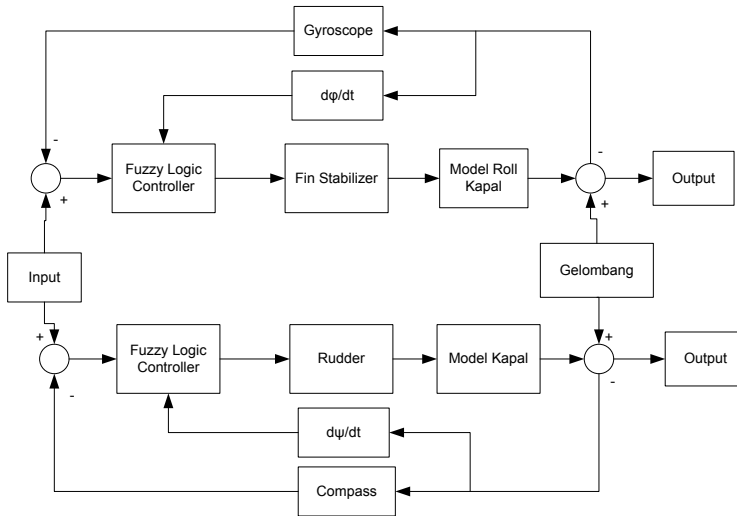
$$h(s) = \frac{0,70784s}{s^2 + 0,224s + 1,2544} \quad (3.30)$$

Pemodelan gangguan gelombang pada *sea state* 4 ( $H = 2,5$  meter):

$$h(s) = \frac{0,5005s}{s^2 + 0,1584s + 0,6272} \quad (3.31)$$

### 3.5 Blok Sistem Kontrol Kapal

Penelitian dilakukan untuk mengendalikan perilaku *seakeeping* kapal. Tujuan dari *seakeeping* adalah bagaimana perilaku operasional kapal untuk menjaga kecepatan dan arahnya untuk tetap konstan ditengah gangguan gelombang (Perez, 2005). Pada penelitian ini dilakukan peninjauan pemodelan kontrol *seakeeping* pada FPB 57 dengan gangguan gelombang. Sesuai dengan dengan data teknis kapal, besar gelombang dimana kapal FPB 57 dapat beroperasi adalah sebesar *sea state* 4. Aktuator yang digunakan pada pemodelan kontrol *seakeeping* FPB 57 adalah *rudder* dan *fin stabilizer* dengan *gyroscope* dan kompas sebagai sensor.



**Gambar 3.4** Diagram Blok Pengendalian

Berdasarkan diagram blok sistem pengendalian (gambar 3.4) di atas, kontrol logika *fuzzy* digunakan sebagai mode kendali. Masukan kendali logika *fuzzy* gerak *yaw* adalah *yaw* dan *error yaw* rate dengan keluaran dari logika *fuzzy* berupa besar sinyal kontrol yang harus diberikan pada *rudder*. Sedangkan masukan kendali logika *fuzzy* gerak *roll* adalah *error roll* dan *error roll* rate dengan keluaran sinyal perintah yang diberikan pada *motor fin stabilizer*.

Pemodelan sistem dinyatakan dalam bentuk *state-space* untuk pengendalian gerak *yaw*. Bentuk *state-space* dari sistem adalah sebagai berikut:

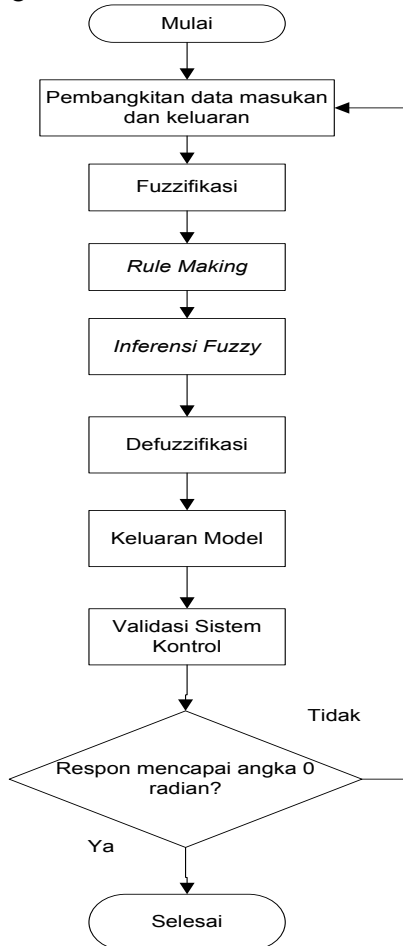
$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ Y &= Cx\end{aligned}\tag{3.32}$$

Nilai matriks A diperoleh dari pemodelan kapal dengan gangguan gelombang. Nilai matriks B diperoleh dari besar sinyal pengendali yang terima oleh *rudder*. Nilai matriks C diperoleh dari nilai variabel yang ditinjau pada penelitian ini.

Sistem dinamika FPB 57 juga dimodelkan dalam bentuk persamaan transfer momen *roll* untuk pengendalian gerak *roll* sebagaimana dinyatakan pada persamaan 3.11

### 3.6 Perancangan Kendali Logika Fuzzy

Pada penelitian ini, kendali yang dirancang menggunakan logika *fuzzy* tipe sugeno. Diagram alir perancangan kendali *fuzzy* dijelaskan pada gambar 3.5 di bawah ini.

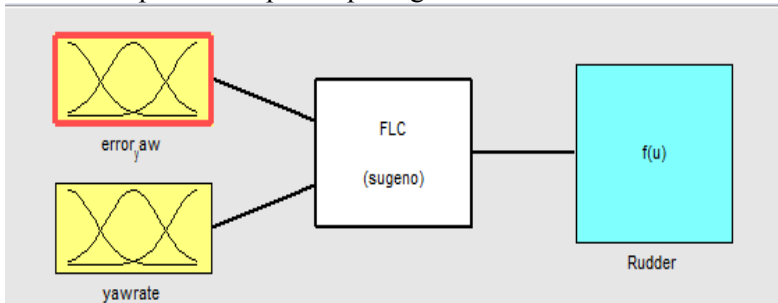


**Gambar 3.5** Diagram Alir Kendali Logika Fuzzy

Pada tahap pembangkitan data masukan dan keluaran, ditentukan masukan dan keluaran dari kendali logika *fuzzy* yang dilanjutkan dengan dengan tahap fuzzifikasi. Tahap fuzzifikasi dilakukan

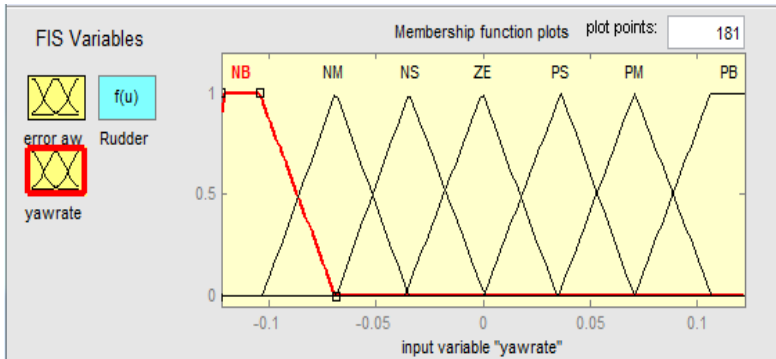
konversi himpunan *crisp* menjadi himpunan *fuzzy*. Selain itu, pada tahap fuzzifikasi ditentukan keanggotaan, *range* dan parameter dari setiap masukan dan keluaran *fuzzy*. Di tahap *rule making*, dilakukan pembuatan kaidah kendali logika *fuzzy* agar mencapai nilai yang telah ditentukan. Tahap selanjutnya adalah inferensi *fuzzy*, dimana dilakukan pengambilan keputusan berdasarkan kaidah yang telah dirancang. Teknik pengambilan keputusan yang digunakan adalah metode Sugeno. Setelah tahap inferensi *fuzzy*, dilakukan defuzzifikasi, dimana dilakukan konversi hasil inferensi *fuzzy* ke dalam bentuk bilangan *crisp*.

Kendali logika *fuzzy yaw* menggunakan dua masukan dengan satu keluaran. Dua masukan yang digunakan adalah *error yaw* dan *error yaw rate*, sedangkan untuk keluaran adalah *command rudder*. Tampilan kendali logika *fuzzy yaw* dengan dua masukan dan satu keluaran seperti ditampilkan pada gambar 3.6.



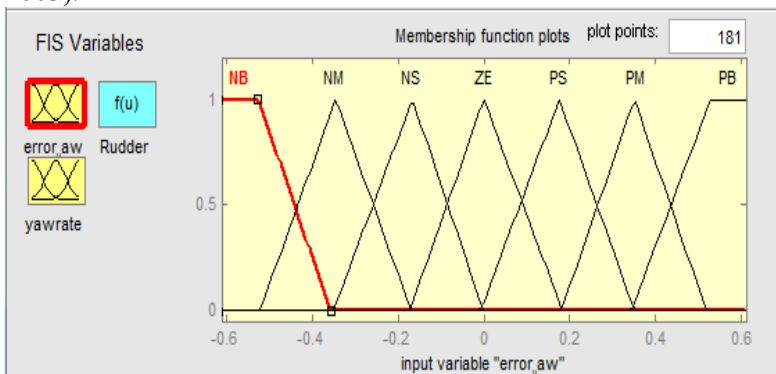
**Gambar 3.6** Kendali Logika *Fuzzy Rudder*

Untuk masukan maupun keluaran logika *fuzzy* ditentukan oleh fungsi keanggotaan masing masing. Fungsi keanggotaan masukan *yawrate* adalah tujuh keanggotaan di mana nilai terkecil dari keanggotaan sebesar  $-7^\circ/\text{s}$  serta nilai terbesar sebesar  $7^\circ/\text{s}$ . Dari ketujuh fungsi keanggotaan masukan *yawrate* berupa dua fungsi keanggotaan trapesium dengan 5 fungsi keanggotaan segitiga. Ketujuh fungsi keanggotaan masukan *yaw* yaitu: *Negative Big (NB)*, *Negative Medium (NM)*, *Negative Small (NS)*, *Zero (ZE)*, *Positive Small (PS)*, *Positive Medium (PM)* dan *Positive Big (PB)* (Velagic, Vukic, & Omerdic, 2003).



**Gambar 3.7** Fungsi Keanggotaan *yawrate*.

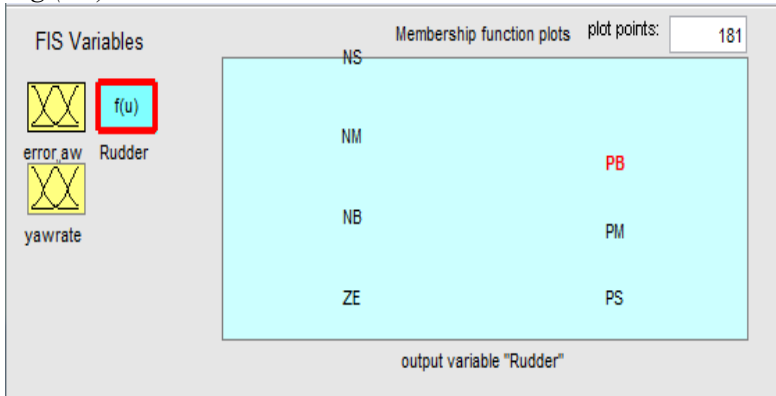
Begitupun pada fungsi keanggotaan masukan *error yaw*, terdapat tujuh fungsi keanggotaan dengan 2 fungsi keanggotaan berupa fungsi keanggotaan trapesium dan 5 lainnya berupa fungsi keanggotaan segitiga. Jangkauan nilai dari fungsi keanggotaan masukan *error yaw* dari  $-35^\circ$  hingga  $35^\circ$ . Ketujuh fungsi keanggotaan masukan *error yaw* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8 adalah sebagai berikut: *Negative Big (NB)*, *Negative Medium (NM)*, *Negative Small (NS)*, *Zero (ZE)*, *Positive Small (PS)*, *Positive Medium (PM)* dan *Positive Big (PB)* (Velagic et al., 2003).



**Gambar 3.8** Fungsi Keanggotaan *error yaw*.

Fungsi keanggotaan output *rudder*, dipilih fungsi keanggotaan konstan. Hal ini diperlukan untuk mencari nilai *gain* yang sesuai

untuk untuk mengendalikan aktuator yang dalam hal ini adalah *rudder*. Nilai terkecil dari keanggotaan sebesar 0 serta nilai terbesar sebesar 1. Ketujuh fungsi keanggotaan masukan *error yawrate* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.9 adalah sebagai berikut: *Negative Big (NB)*, *Negative Medium (NM)*, *Negative Small (NS)*, *Zero (ZE)*, *Positive Small (PS)*, *Positive Medium (PM)* dan *Positive Big (PB)*.



**Gambar 3.9** Fungsi Keanggotaan *rudder*.

Terdapat 49 *rule base* kendali logika *fuzzy* digunakan dengan *if...and.....then.... rule*. Basis aturan tersebut ditampilkan dalam tabel 3.2 dan dengan tampilan *surface* aturan *fuzzy* pada gambar 3.10.

*Rules base* dalam logika *fuzzy rudder* ditunjukkan pada persamaan 3.33 – 3.36 berikut:

$$R1: \text{If error\_yaw is NB and yawrate is NB then K is Z(1)} \quad (3.33)$$

$$R2: \text{If error\_yaw is NB and yawrate is NS then K is NS(1)} \quad (3.34)$$

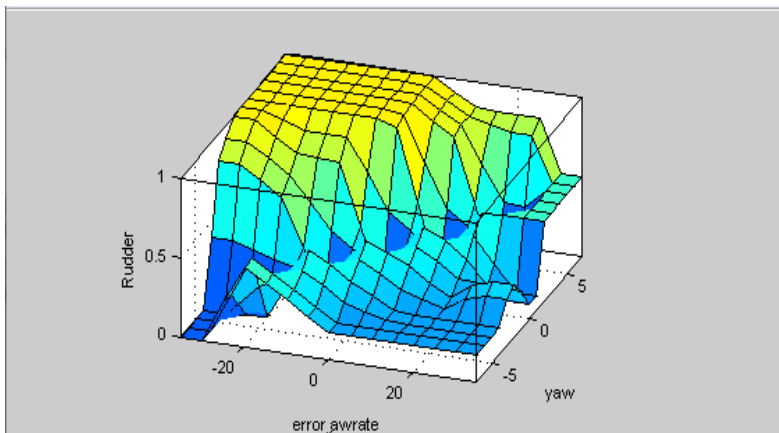
$$R3: \text{If error\_yaw is NB and yawrate is NS then K is NM(1)} \quad (3.35)$$

$$R49: \text{If error\_yaw is PB and yawrate is PB then K is Z(1)} \quad (3.36)$$



**Tabel 3.3** Basis aturan kendali logika *fuzzy rudder*

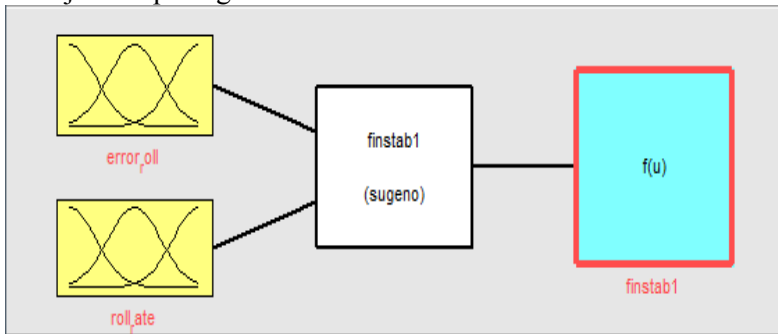
$e^*/r$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	Z	NS	NM	NB	NB	NB	NB
NM	Z	Z	NS	NM	NB	NB	NB
NS	PM	PS	Z	NS	NM	NB	NB
Z	PB	PM	PM	Z	NS	NM	NB
PS	PB	PB	PB	PM	Z	NS	NM
PM	PB	PB	PB	PB	PM	Z	NS
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PM	Z

**Gambar 3.10** Tampilan *Surface* dari Kontrol *fuzzy rudder*

Berdasarkan tampilan *surface* dari kendali logika *fuzzy rudder* yang ditampilkan pada gambar 3.10 di atas diketahui bahwa ada beberapa aturan yang memiliki *gain rudder* yang bernilai satu. *Gain rudder* yang bernilai satu dimiliki oleh *rule* yang dibentuk dari nilai fungsi keanggotaan *yaw Positive Big* (PB), *Positive Medium* (PM) dan sebagian *Positive Small* (PS) dengan nilai fungsi keanggotaan *error\_yawrate Negative Big* (NB), *Negative Medium* (NM) dan sebagian *Negative Small* (NS). *Surface* mengalami penurunan secara gradual hingga mencapai nilai *gain rudder* 0, dan

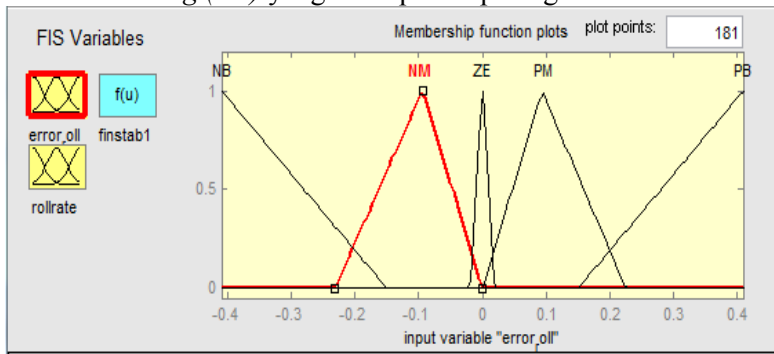
mengalami kenaikan signifikan pada nilai *gain rudder* 0,5. *Surface* kembali menurun dan mengalami kondisi tetap pada nilai *gain rudder* 0,25.

Untuk kendali gerak *roll*, pada kapal FPB 57 digunakan *fin stabilizer* yang dikendalikan dengan metode *fuzzy*. *Fuzzy* yang digunakan menggunakan dua masukan, yaitu yakni *error roll* dan *roll rate* dan satu keluaran, yaitu sinyal *command motor fin* yang ditunjukkan pada gambar 3.11 di bawah ini.



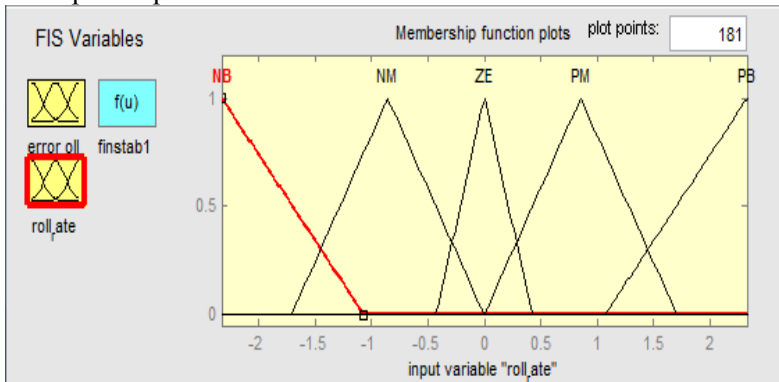
**Gambar 3.11** Kendali Logika Fuzzy Fin Stabilizer

Fungsi keanggotaan masukan *error roll*, terdapat lima fungsi keanggotaan berupa fungsi keanggotaan segitiga. Jangkauan nilai dari fungsi keanggotaan masukan *error yaw* dari  $-23^\circ$  hingga  $23^\circ$ . Kelima fungsi keanggotaan masukan *error yaw* yaitu: *Negative Big (NB)*, *Negative Medium (NM)*, *Zero (ZE)*, *Positive Medium (PM)* dan *Positive Big (PB)* yang ditampilkan pada gambar 3.12.



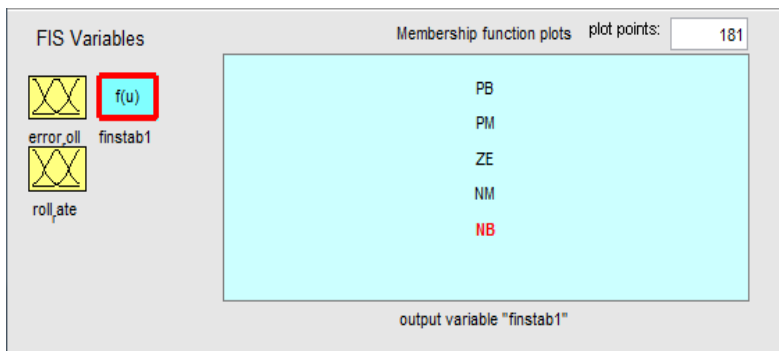
**Gambar 3.12** Fungsi Keanggotaan *error roll*

Untuk masukan maupun keluaran logika *fuzzy* ditentukan fungsi keanggotaan masing masing. Fungsi keanggotaan masukan *rollrate* adalah lima keanggotaan dimana nilai terkecil dari keanggotaan sebesar  $-7^\circ/s$  serta nilai terbesar sebesar  $7^\circ/s$  dengan lima fungsi keanggotaan. Kelima fungsi keanggotaan *rollrate* masukan yakni: *Negative Big (NB)*, *Negative Medium (NM)*, *Zero (ZE)*, *Positive Medium (PM)* dan *Positive Big (PB)* yang ditampilkan pada Gambar 3.13.



**Gambar 3.13** Fungsi Keanggotaan *rollrate*

Untuk fungsi keanggotaan keluaran *finstab*, dipilih fungsi keanggotaan konstan. Hal ini diperlukan untuk mencari nilai *gain* yang sesuai untuk untuk mengontrol aktuatur yang dalam hal ini adalah *fin stabilizer*. Nilai terkecil dari keanggotaan sebesar 0 serta nilai terbesar sebesar 1. Kelima fungsi keanggotaan masukan *error yawrate* yaitu *Negative Big (NB)*, *Negative Medium (NM)*, *Zero (ZE)*, *Positive Medium (PM)* dan *Positive Big (PB)*.



**Gambar 3.14** Fungsi Keanggotaan *finstab*

Terdapat 25 *rule base* kendali logika *fuzzy* digunakan dengan *if...and.....then.... rule*. Basis aturan tersebut ditampilkan dalam tabel 3.3 dengan tampilan *surface* aturan *fuzzy* ditunjukkan pada gambar 3.15.

**Tabel 3.4** Basis aturan kendali logika *fuzzy fin stabilizer*

e*/r	NB	NM	Z	PM	PB
NB	Z	PM	PM	PB	PB
NM	NM	Z	PM	PM	PB
Z	NB	NM	Z	PM	PB
PM	NB	NB	NB	Z	PM
PB	NB	NB	NB	NB	Z

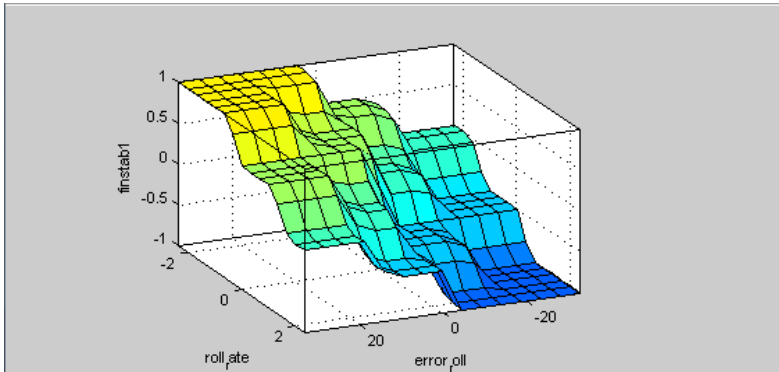
*Rule base fin stabilizer* ditunjukkan pada persamaan 3.37 – 3.40 berikut:

R1: If error\_roll is NB and rollrate is NB then finstab1 is Z(1)  
(3.37)

R2: If error\_roll is NB and rollrate is NM then finstab1 is PM  
(1) (3.38)

R3: If error\_roll is NB and rollrate is Z then finstab1 is PM (1)  
(3.39)

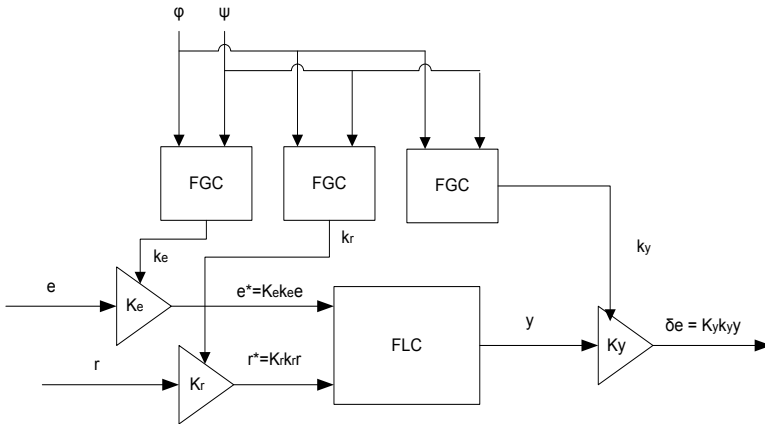
R25: If error\_roll is PB and rollrate is PB then finstab1 is Z  
 (1) (3.40)



**Gambar 3.15** Tampilan *Surface* kendali *fuzzy fin stabilizer*

Pada *surface fuzzy fin stabilizer* yang ditampilkan pada gambar 3.15 di atas, menunjukkan ada beberapa aturan yang menghasilkan nilai *gain fin* bernilai 1. Aturan yang menghasilkan nilai *gain fin* 1 dibentuk oleh fungsi keanggotaan *rollrate Negative Big* (NB) dan sebagian *Negative Medium* (NM) dengan fungsi keanggotaan *error roll Positive Big* (PB) dan sebagian *Positive Medium* (PM). Tampilan *surface fin stabilizer* mengalami penurunan hingga nilai *gain nilai fin* bernilai 0. Nilai 0 dibentuk aturan yang dibangun oleh fungsi keanggotaan *error roll Negative Big* (NB) dan *Negative Medium* (NM) dengan fungsi *rollrate Positive Big* (PB) dan sebagian *Positive Medium* (PM).

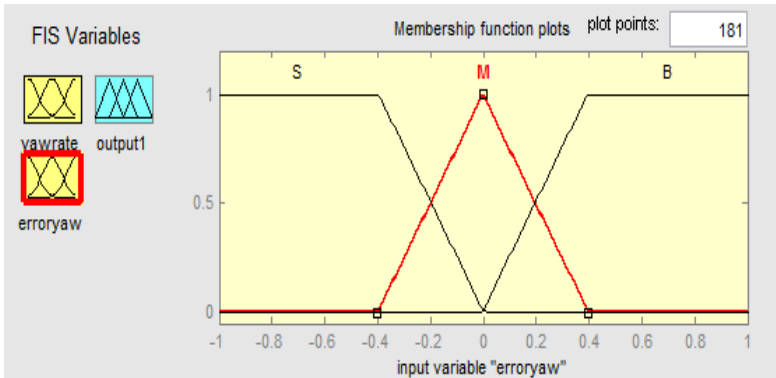
Perancangan kendali *seakeeping* yang telah dilakukan memerlukan skenario pengendali tambahan bila hasil kendali tidak sesuai dari *setpoint* yang ditentukan, terutama pada kendali gerak *yaw* kapal. Skenario kendali tambahan *seakeeping* diperlukan, berupa sebuah rangkaian *loop* adaptif yang menentukan besar faktor skala. Nilai faktor skala sendiri ditentukan dari nilai besarnya selisih *yaw* yang kemudian diolah menjadi nilai faktor skala yang dibutuhkan (Velagic et al., 2003). Blok sistem kendali *loop* adaptif ditunjukkan pada gambar 3.16.



**Gambar 3.16** *Fuzzy Gain Controller* (Velagic et al., 2003)

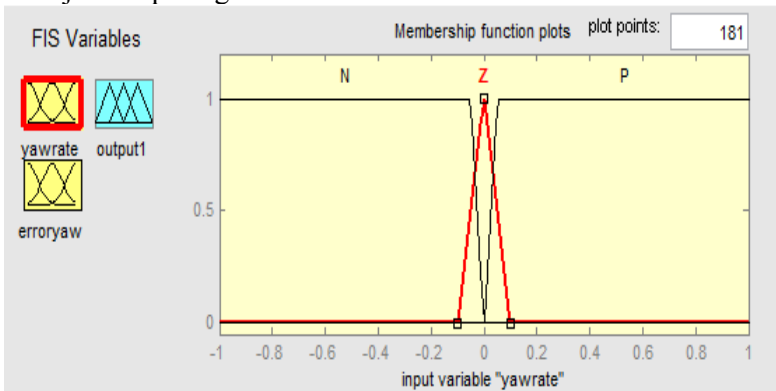
*Loop* adaptif merupakan kendali *fuzzy* Mamdani dengan dua masukan berupa *error yaw* dan *yawrate* dan satu output yakni nilai gain  $k$ . Dari penjelasan di atas, *loop* adaptif berfungsi sebagai *Fuzzy Gain Controller* (FGC). Pada diagram blok FGC yang ditampilkan pada gambar 3.16, terdapat pemberian nilai *gain*  $k_e$ ,  $k_r$  dan  $k_y$  untuk variable  $e$ ,  $r$  dan  $y$  yang diperoleh melalui secara *fuzzy*. Hasil pemberian nilai *gain* dijadikan sinyal masukan kendali *fuzzy* gerak *yaw* (kendali *fuzzy rudder*).

Fungsi keanggotaan masukan *error yaw* terdiri dari tiga fungsi keanggotaan, yaitu *Small* (S), *Medium* (M) dan *Big* (B). Tiga fungsi keanggotaan *error yaw* memiliki bentuk dua fungsi trapesium dan satu segitiga. Fungsi keanggotaan *error yaw* ditunjukkan pada gambar 3.17 di bawah ini.



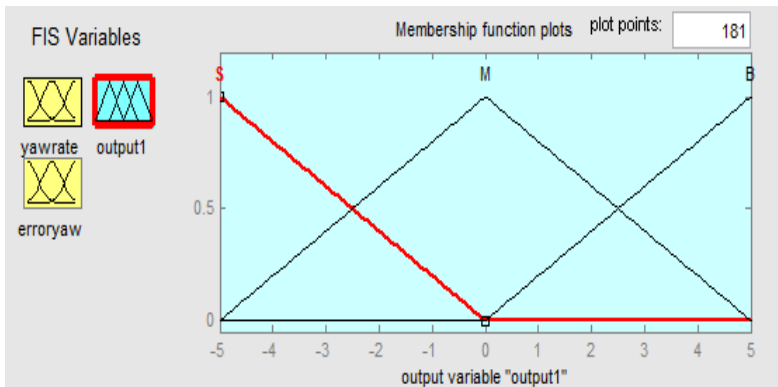
**Gambar 3.17** Fungsi Keanggotaan *error yaw* FGC

Fungsi keanggotaan masukan *yawrate* terdiri dari tiga fungsi keanggotaan, yaitu *Negative* (N), *Zero* (Z) dan *Positive* (P). Tiga fungsi keanggotaan *error yaw* memiliki bentuk dua fungsi trapesium dan satu segitiga. Fungsi keanggotaan *error yaw* ditunjukkan pada gambar 3.18 di bawah ini.



**Gambar 3.18** Fungsi Keanggotaan *yawrate* FGC

Fungsi keanggotaan *gain k* terdiri dari tiga fungsi keanggotaan, yaitu *Small* (S), *Medium* (M) dan *Big* (B). Fungsi keanggotaan keluaran *gain k* memiliki bentuk dua fungsi trapesium dan satu segitiga. Fungsi keanggotaan *gain k* ditunjukkan pada gambar 3.19 di bawah ini.



**Gambar 3.19** Fungsi Keanggotaan *gain k* FGC

*Rule base* yang digunakan pada *Fuzzy Gain Controller* ditunjukkan pada persamaan 3.41 – 3.44 berikut:

R1: If yawrate is N and erroryaw is S then output1 is S (1) (3.41)

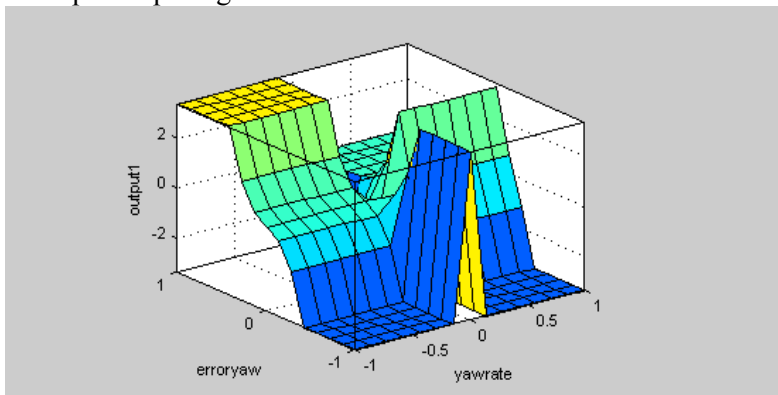
R2: If yawrate is N and erroryaw is M then output1 is M (1) (3.42)

R3: If yawrate is N and erroryaw is B then output1 is B (1) (3.43)

...

R9: If yawrate is P and erroryaw is B then output1 is M (1) (3.44)

Tampilan *surface* dari *Fuzzy Gain Control loop* adaptif adalah ditampilkan pada gambar 3.20 di bawah ini.



**Gambar 3.20** Tampilan *Surface Fuzzy Gain Control*



Dari tampilan *surface Fuzzy Gain Control* yang ditunjukkan oleh gambar 3.20 dapat diketahui bentuk dari penerapan aturan *Fuzzy Gain Controller*. Berdasarkan bentuk *surface* yang ditampilkan, terdapat beberapa nilai aturan yang ekstrem besar dan ekstrem kecil. Jarak antara nilai ekstrem besar dan ekstrem kecil memiliki kecuraman yang tajam. Selain memiliki nilai ekstrem, hasil penerapan aturan FGC juga terdapat nilai tengah, yang ditunjukkan dengan adanya bidang datar bernilai 0. Bidang tersebut dihasilkan oleh aturan dengan fungsi keanggotaan *error yaw Big* (B) dengan fungsi keanggotaan *yawrate Positive* (P).

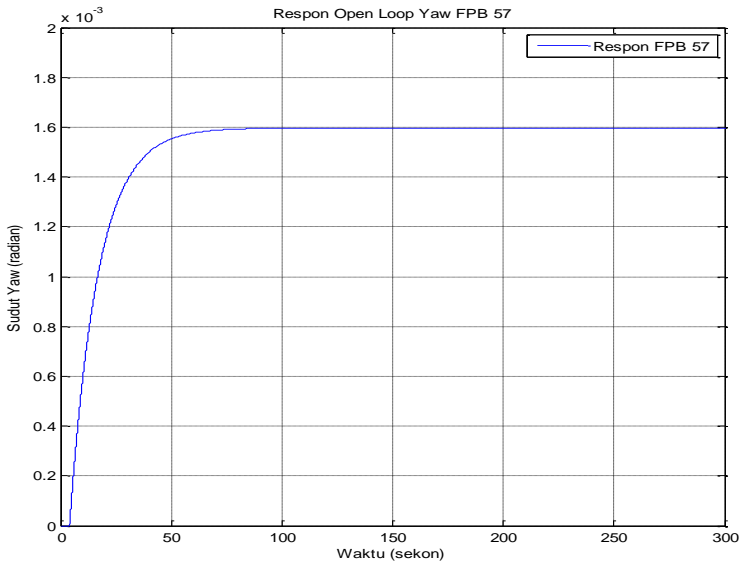
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dilakukan analisis hasil perancangan sistem kendali logika *fuzzy* untuk kestabilan *seakeeping* dari kapal FPB 57. Analisis dimulai dengan menguji kestabilan *seakeeping* FPB 57 menggunakan metode *open loop* yang dilanjutkan dengan pengujian gangguan gelombang pada kapal FPB 57. Dari hasil respon FPB 57 yang diperoleh dilakukan analisis kestabilan gerak *roll* dan *yaw* menggunakan perangkat lunak MatLab.

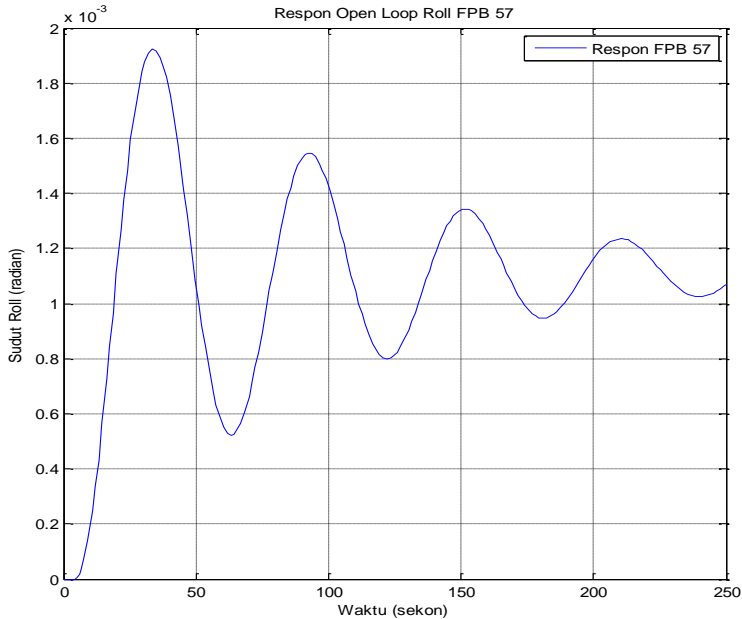
### 4.1 Analisis Pengujian *Open Loop* dari FPB 57

Pengujian *open loop* dimaksudkan untuk mengetahui respon kapal FPB 57 sebelum diberikan perlakuan kendali *fuzzy*. Pengujian dilakukan dengan memberikan masukan sinyal *step* pada sistem.



**Gambar 4.1** Respon *Open Loop* Yaw dari FPB 57

Dari hasil pengujian yang ditunjukkan oleh gambar 4.1 respon sistem mencapai keadaan tunak pada  $1,6 \times 10^{-3}$  radian dengan *settling time* yang dibutuhkan adalah sebesar 70 detik. Respon FPB 57 tidak mengalami osilasi dan naik secara signifikan hingga mencapai keadaan tunak pada  $1,6 \times 10^{-3}$  radian pada detik ke-70.



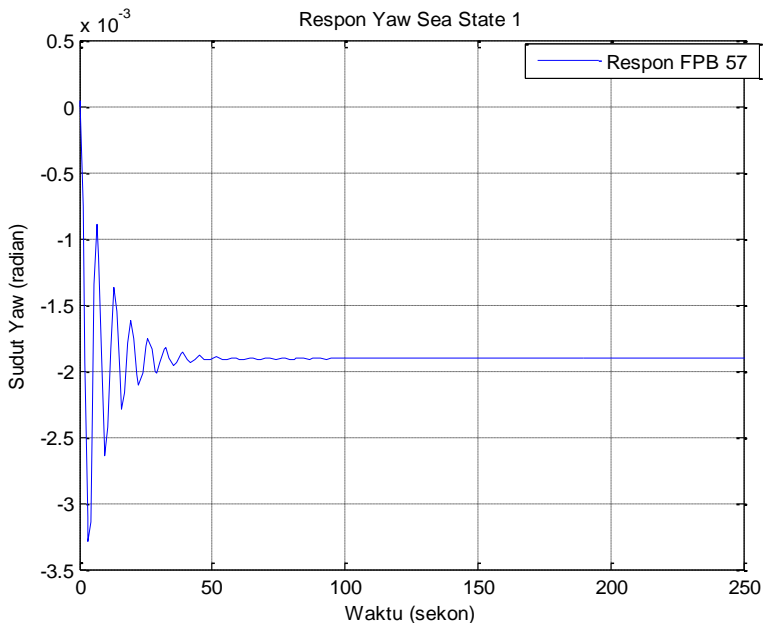
**Gambar 4.2** Respon Open Loop *Roll* dari FPB 57

Respon *open loop roll* yang diperoleh untuk *roll* dari FPB 57 ditunjukkan pada gambar 4.2 memiliki *overshoot* sebesar  $1,9 \times 10^{-3}$  radian dengan *settling time* sebesar 247 detik. Respon *roll* FPB 57 mengalami osilasi yang signifikan dengan periode sebesar 70 detik. Puncak pertama dari osilasi respon *roll* sebesar  $1,9 \times 10^{-3}$  radian yang dicapai pada detik ke-45 detik. Puncak kedua sebesar  $1,5 \times 10^{-3}$  radian yang dicapai pada detik ke-85. Respon mencapai keadaan tunak pada  $1,15 \times 10^{-3}$  radian dengan waktu yang dibutuhkan sebesar 247 detik. Dari hasil yang didapatkan, kedua

respon bersifat stabil dan memerlukan kendali agar masukan yang diberikan menghasilkan keluaran diinginkan sesuai *setpoint*.

#### 4.2 Analisis Kapal Respon Roll dan Yaw FPB 57 dengan Penerapan Kendali Logika *Fuzzy*

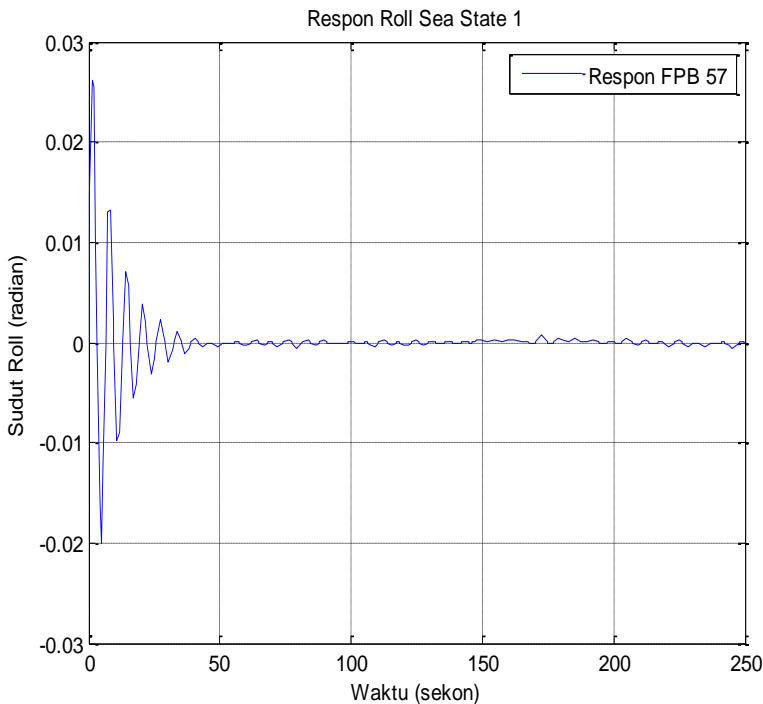
Analisis respon *yaw* dan *roll* dilakukan dengan mengujikan sistem kendali *fuzzy* yang telah dirancang dengan memberikan gangguan dalam bentuk frekuensi gelombang. *Rule base* kendali logika *fuzzy* yang digunakan untuk gerak *yaw* adalah sesuai dengan yang ditampilkan pada tabel 3.2. Untuk gerak *roll*, *rule base* yang digunakan adalah sesuai dengan yang ditunjukkan pada tabel 3.3. Adapun respon gerak *yaw* dan *roll* dari hasil penerapan dari kendali *fuzzy* yang telah dirancang dengan gangguan gelombang ditampilkan pada gambar 4.3 dan 4.4 dibawah ini.



**Gambar 4.3** Respon *Yaw Sea State 1*

Hasil respon pengujian yang ditunjukkan pada gambar 4.3 di atas adalah hasil respon gerak *yaw* dengan gangguan gelombang

yang diberikan sebesar *sea state* 1. Berdasarkan respon *yaw* yang dihasilkan, diperoleh *error steady state* sebesar  $1,89 \times 10^{-3}$  radian dengan *peak time* sebesar 3,203 sekon. *Maximum overshoot* yang diperoleh sebesar  $3,3 \times 10^{-3}$  radian dengan *settling time* sebesar 51,27 sekon. Respon yang dihasilkan tidak sesuai *setpoint*, dimana respon berosilasi di bawah nilai nol. Respon mengalami osilasi, dengan puncak osilasi terbesar adalah sebesar  $3,3 \times 10^{-3}$  radian, yang dicapai pada detik ke-3,203. Respon mencapai keadaan tunak pada detik ke-51,27.



**Gambar 4.4** Respon *Roll* sea state 1

Hasil respon gerak *roll* yang ditampilkan pada gambar 4.4 diperoleh nilai *error steady state* sebesar  $3,86 \times 10^{-4}$  radian dengan *peak time* sebesar 1,204 sekon. *Maximum overshoot* yang diperoleh adalah sebesar  $2,62 \times 10^{-2}$  radian dengan *settling time* sebesar

43,32 sekon. Respon yang dihasilkan mengalami osilasi, dengan puncak osilasi terbesar adalah sebesar  $2,62 \times 10^{-2}$  radian yang dicapai pada detik ke-1,204. Respon mencapai keadaan tunak pada detik ke-43,32.

#### **4.2.1 Analisis *Rule Base* yang Telah Disusun Berdasarkan Respon yang Dihasilkan**

Pengujian telah dilakukan terhadap *rule base* yang telah dirancang, baik *rule base* untuk gerak *yaw* maupun *rule base* untuk gerak *roll*. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, dengan menggunakan gangguan gelombang dengan besar gelombang yang bervariasi sesuai dengan kemampuan operasi kapal (*sea state 1 – sea state 4*) respon gerak *yaw* yang dihasilkan tidak mampu untuk mencapai *setpoint* yang telah ditentukan (0 radian). Sedangkan untuk respon gerak *roll* yang dihasilkan mampu mencapai *setpoint* yang telah ditentukan. Hal ini dikarenakan perancangan *rule base* untuk gerak *yaw* yang belum sesuai dengan nilai *error yaw* dan *yawrate*, dimana ada nilai dari fungsi keanggotaan *Positive Small* (PS) dan *Positive Medium* (PM). Adanya nilai dari fungsi keanggotaan *Positive Small* (PS) dan *Positive Medium* (PM) yang menyebabkan respon mencapai kondisi tunak dibawah *setpoint* yang telah ditentukan.

#### **4.2.2 Perubahan *Rule Base* Sistem Kendali Logika Fuzzy**

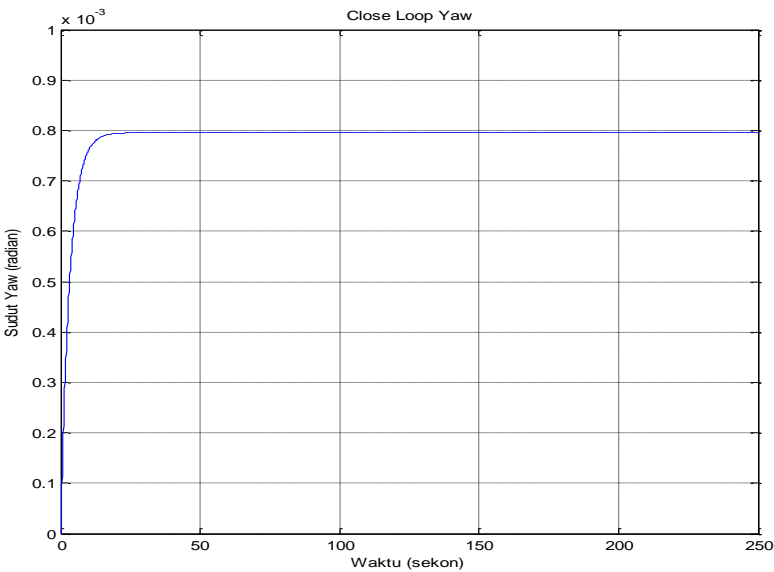
Sebagaimana telah dibahas pada subbab sebelumnya, kondisi ketidakmampuan respon gerak *yaw* untuk mencapai *setpoint* diakibatkan oleh adanya nilai dari fungsi keanggotaan *Positive Small* (PS) dan *Positive Medium* (PM), maka pada subbab ini akan ditampilkan perubahan *rule base* untuk gerak *yaw*. Nilai fungsi keanggotaan dari *Positive Small* (PS) dan *Positive Medium* (PM) digantikan dengan nilai keanggotaan *Positive Big* (PB). Perubahan *rule base* untuk kendali logika fuzzy gerak *yaw* (*rudder*) akan ditunjukkan pada tabel 4.1 berikut.

**Tabel 4.1** Rule Base Kendali Logika Fuzzy gerak yaw

e*/r	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	Z	NS	NM	NB	NB	NB	NB
NM	PB	Z	NS	NM	NB	NB	NB
NS	PB	PB	Z	NS	NM	NB	NB
Z	PB	PB	PB	Z	NS	NM	NB
PS	PB	PB	PB	PB	Z	NS	NM
PM	PB	PB	PB	PB	PB	Z	NS
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	Z

4.2.3 Uji *Close loop* Tanpa Gangguan Gelombang

Uji ini dilakukan dengan menyertakan kendali logika *fuzzy* yang telah dirancang tanpa diberikan gangguan.



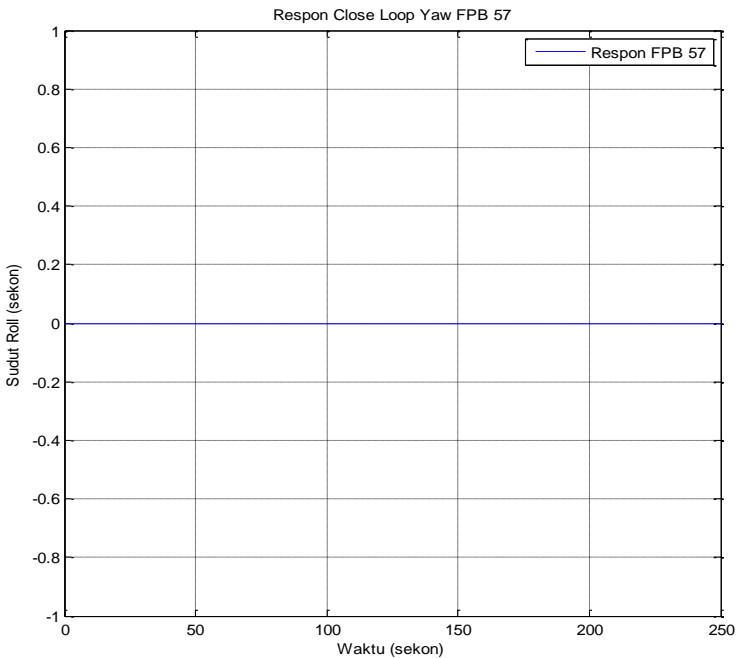
**Gambar 4.5** Respon Blok *Close loop* Yaw

Berdasarkan respon yang ditampilkan pada gambar 4.5, diperoleh respon *close loop yaw* tanpa gangguan gelombang.



Respon mencapai keadaan tunak pada  $0,8 \times 10^{-3}$  radian dengan *settling time* sebesar 25 sek. Respon yang dihasilkan tidak mengalami osilasi dan mengalami kenaikan signifikan hingga mencapai kondisi tunak pada angka  $0,8 \times 10^{-3}$  radian yang dicapai pada detik ke-25.

Dibandingkan dengan hasil respon pengujian *open loop*, respon yang dihasilkan pengujian *close loop* mengalami penurunan dibandingkan dengan hasil respon pengujian *open loop*. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan besar *settling time* dari 70 sek. menjadi 25 sek. serta penurunan respon tunak dari  $1,6 \times 10^{-3}$  radian menjadi  $0,8 \times 10^{-3}$  radian.



**Gambar 4.6** Respon *Close loop Roll*

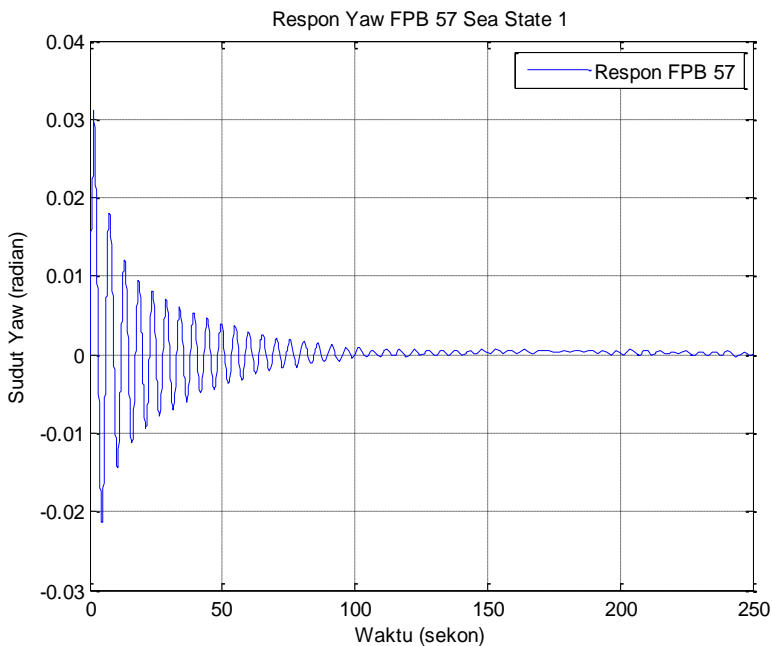
Respon *close loop* yang ditunjukkan oleh gambar 4.4, dapat diketahui respon *close loop roll* tanpa gangguan stabil di 0 radian. Artinya, tanpa adanya gangguan kapal FPB 57 tidak mengalami

gerakan *roll*. Dibandingkan dengan hasil respon pengujian *open loop*, respon yang dihasilkan pengujian *close loop* mengalami penurunan dibandingkan dengan hasil respon pengujian *open loop*. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan besar *settling time* dari 247 sekon menjadi 0 sekon dan penurunan respon tunak dari  $1,15 \times 10^{-3}$  radian menjadi 0 radian.

Berdasarkan perbandingan hasil respon *close loop* dengan hasil respon *open loop*, maka dapat diambil kesimpulan bahwa kendali yang dirancang telah sesuai.

#### 4.2.4 Analisis Kapal FPB 57 dengan Gangguan Gelombang Sea state 1

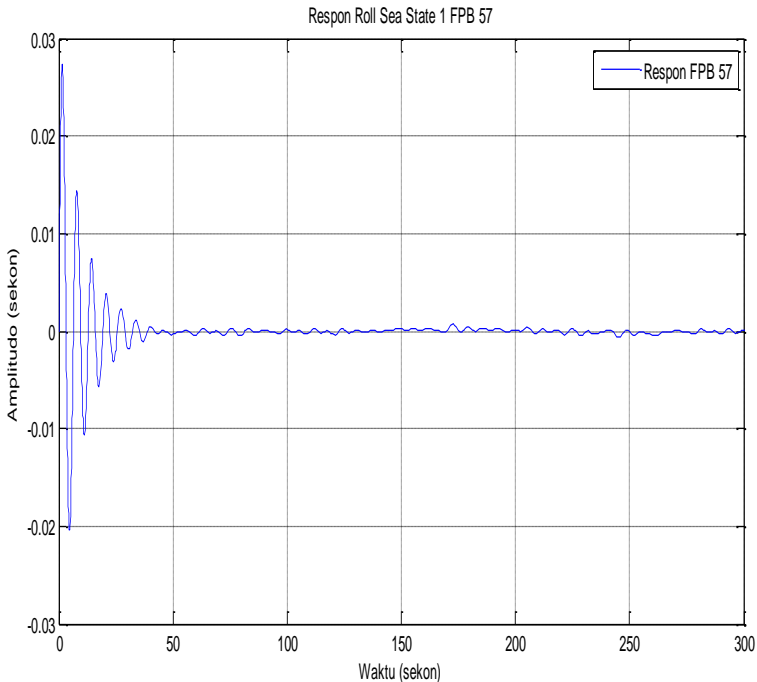
Setelah dilakukan pengujian *close loop*, kapal FPB 57 dilakukan pengujian dengan menggunakan gelombang pada sea state 1 ( $h_{maks} = 0,1$  m)(tabel 2.3).



**Gambar 4.7** Respon *Close loop* Yaw Sea state 1

Dari respon ditunjukkan pada gambar 4.6, diperoleh *error steady state* sistem ketika diberi gangguan gelombang *sea state 1* sebesar  $9,78 \times 10^{-4}$  radian dengan *peak time* sebesar 1,323 sekon dengan *maximum overshoot*  $3,12 \times 10^{-2}$  radian serta *settling time* sebesar 96,3 sekon. Respon yang dihasilkan mengalami osilasi, dengan periode 5,26 sekon. Puncak osilasi tertinggi adalah sebesar  $3,12 \times 10^{-2}$  radian yang dicapai pada detik ke-1,323 sekon. Respon tetap berosilasi hingga mencapai kondisi tunak pada detik ke-96,3.

Dari data di atas dapat diartikan bahwa pada kondisi *sea state 1*, kapal FPB 57 sempat mengalami kemiringan *yaw* maksimal sebesar  $3,12 \times 10^{-2}$  radian dan kembali kondisi tunak setelah detik ke-96,3.



**Gambar 4.8** Respon *Close loop Roll Sea state 1*

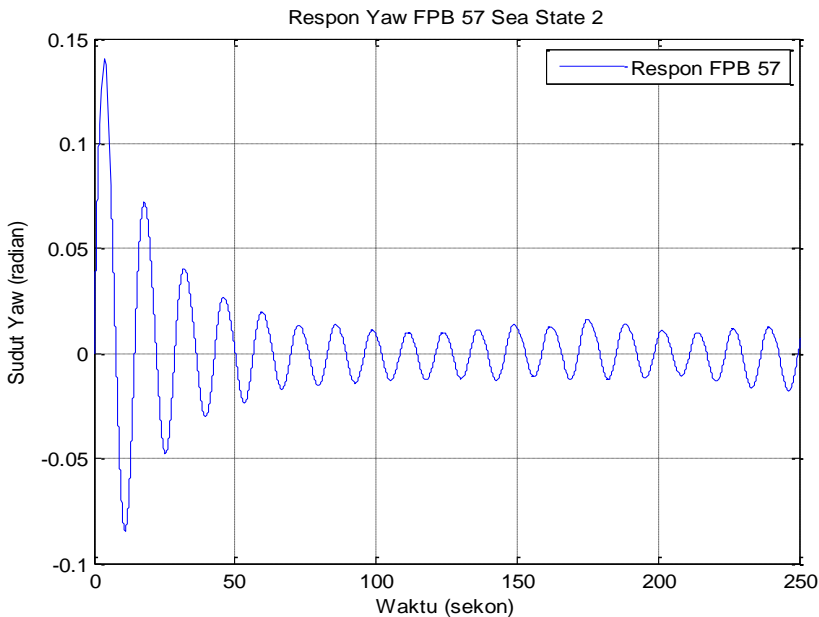
Berdasarkan respon yang ditampilkan oleh gambar 4.7 di atas, diperoleh *error steady state* sebesar  $3,86 \times 10^{-4}$  radian dengan *peak*

*time* sebesar 1,204 sekon. *Maximum overshoot* yang diperoleh sebesar  $2,624 \times 10^{-2}$  radian dengan *settling time* sebesar 43,32 sekon. Respon mengalami osilasi dengan periode 7,14 sekon. Puncak osilasi tertinggi adalah sebesar  $2,624 \times 10^{-2}$  radian yang dicapai pada detik ke-1,204 sekon. Respon tetap berosilasi hingga mencapai kondisi tunak pada detik ke-43,32 sekon.

Dari data yang telah diperoleh, dapat diartikan bahwa kapal FPB 57 sempat mengalami oleng maksimal sebesar  $2,624 \times 10^{-2}$  radian dan kembali kondisi tunak setelah detik ke-43,32 sekon.

#### 4.2.5 Analisis Kapal FPB 57 dengan Gangguan Gelombang *Sea state 2*

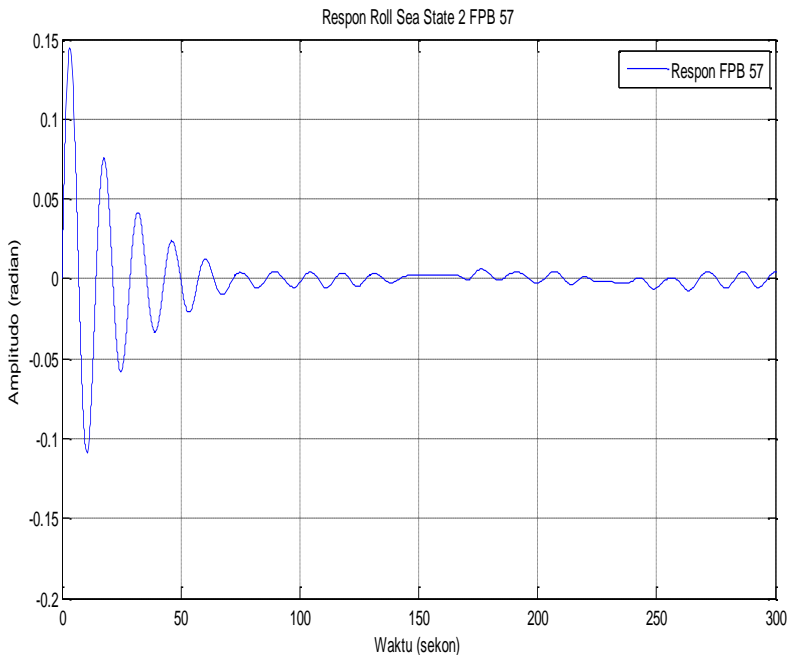
Keadaan *sea state 2* dideskripsikan bersifat *smooth* (*wavelets*). Kapal FPB 57 diuji dengan menggunakan gelombang pada *sea state 2* ( $h_{maks} = 0,5$  m)(tabel 2.3).



**Gambar 4.9** Respon *Close loop* Yaw *Sea state 2*

Dari respon gerak *yaw* yang ditampilkan pada gambar 4.8, diperoleh *error steady state* sistem ketika diberi gangguan gelombang *sea state* 2 sebesar  $1.081 \times 10^{-3}$  radian dengan *peak time* sebesar 3,72 sekon. *Maximum overshoot* yang diperoleh sebesar  $1.406 \times 10^{-1}$  radian dengan *settling time* sebesar 111,3 sekon. Respon mengalami osilasi dengan periode 11,11 sekon. Nilai osilasi terbesar adalah sebesar  $1.406 \times 10^{-1}$  radian. Respon tetap berosilasi hingga mencapai keadaan tunak pada detik ke-111,3.

Dari data di atas dapat diartikan bahwa pada kondisi *sea state* 2, kapal FPB 57 sempat mengalami kemiringan *yaw* maksimal sebesar  $1,406 \times 10^{-1}$  radian dan kembali kondisi tunak setelah detik ke-111,3.



**Gambar 4.10** Respon *Close loop Roll Sea state 2*

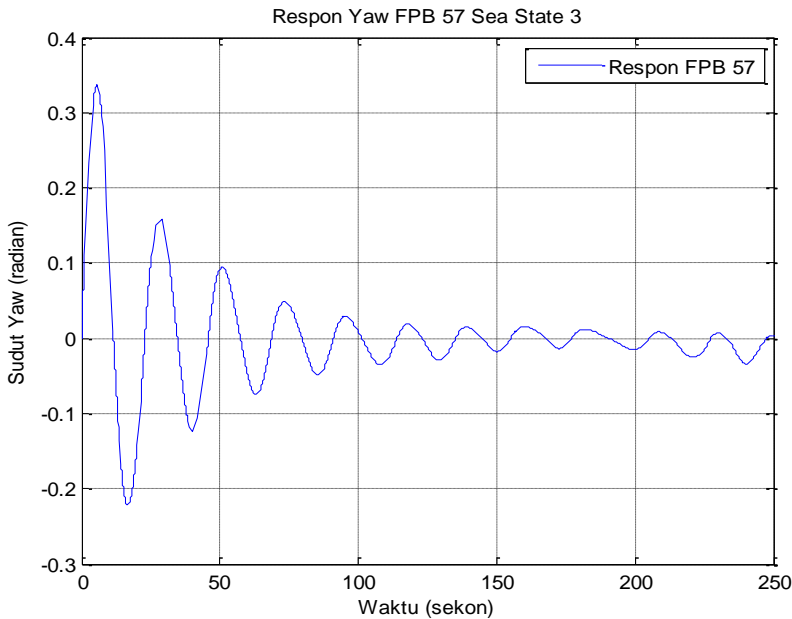
Dari hasil respon gerak *roll* yang ditampilkan pada gambar 4.9 di atas, didapatkan *error steady state* sebesar  $5,436 \times 10^{-3}$  radian dengan *peak time* sebesar 4,035 sekon. *Maximum overshoot* yang

didapatkan adalah sebesar  $1,38 \times 10^{-1}$  radian dengan *settling time* sebesar 96,62 sekon. Respon yang dihasilkan mengalami osilasi, dengan periode 12,5 sekon. Puncak osilasi tertinggi adalah sebesar  $1,48 \times 10^{-1}$  radian yang dicapai pada detik ke-4,035. Respon tetap berosilasi hingga mencapai kondisi tunak yang dicapai di detik ke-96,62.

Dari data yang diperoleh dapat dikatakan bahwa pada kondisi *sea state 2*, kapal FPB 57 sempat mengalami oleng maksimal sebesar  $1,38 \times 10^{-1}$  radian dan kembali kondisi tunak setelah detik ke-96,62.

#### 4.2.6 Analisis Kapal FPB 57 dengan Gangguan Gelombang *Sea state 3*

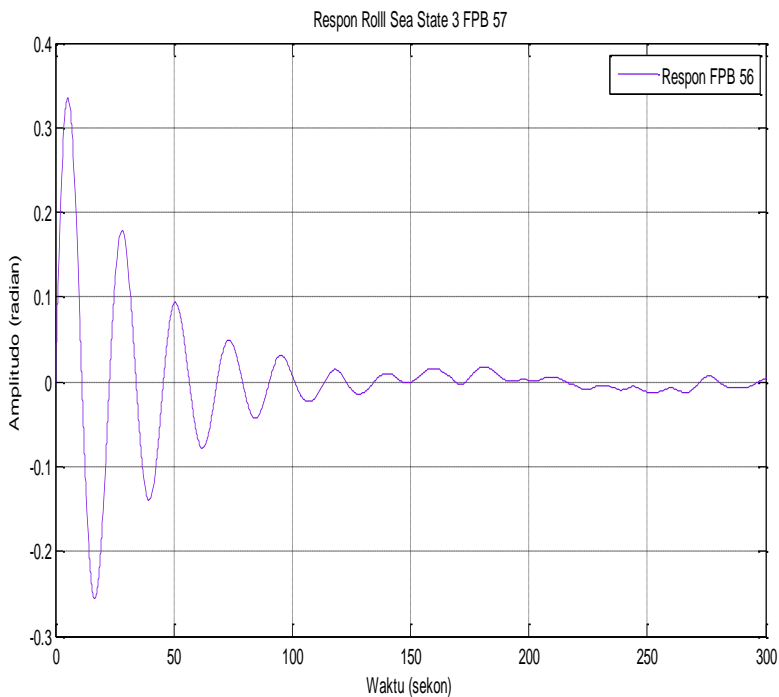
Keadaan *sea state 3* dijelaskan berkarakteristik *slight*. Kapal FPB 57 diujikan dengan menggunakan gelombang pada *sea state 3* ( $h_{\text{maks}} = 1,25 \text{ m}$ )(tabel 2.3).



**Gambar 4.11** Respon *Close loop* Yaw *Sea state 3*

Berdasarkan respon gerak *yaw* yang ditampilkan pada gambar 4.10, diperoleh *error steady state* sistem ketika diberi gangguan gelombang *sea state* 3 sebesar  $1,489 \times 10^{-2}$  radian dengan *peak time* sebesar 5,722 sekon. *Maximum overshoot* yang diperoleh adalah sebesar  $3,365 \times 10^{-1}$  radian dengan *settling time* sebesar 139,5 sekon. Respon mengalami osilasi dengan periode 20 sekon. Puncak osilasi terbesar adalah sebesar  $3,365 \times 10^{-1}$  radian yang dicapai pada detik ke-5,772. Respon tetap berosilasi hingga mencapai kondisi tunak pada detik ke-139,5.

Dari data yang diperoleh dapat dikatakan bahwa pada kondisi *sea state* 3, kapal FPB 57 sempat mengalami *yaw* maksimal sebesar  $3,365 \times 10^{-1}$  radian dan kembali kondisi tunak setelah detik ke-139,5.



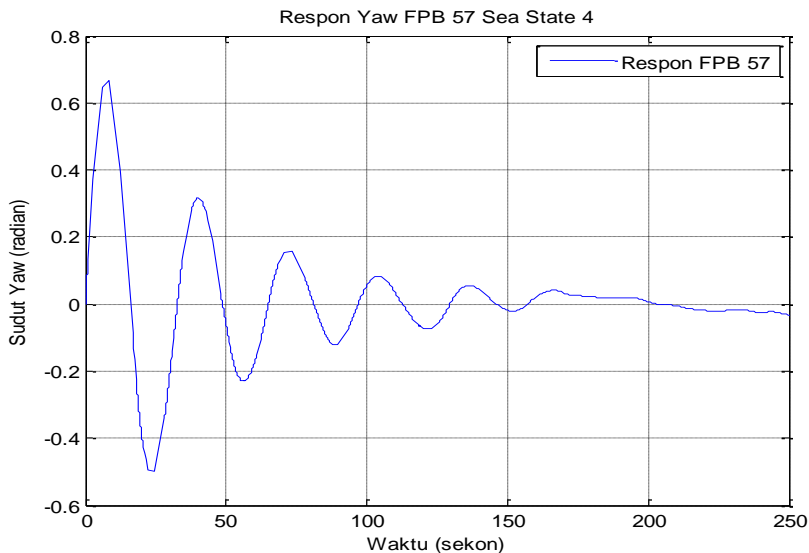
**Gambar 4.11** Respon *Close Loop Roll Sea state* 3

Dari respon gerak *roll* yang ditunjukkan pada gambar 4.11 di atas, diperoleh *error steady state* sebesar  $1,34 \times 10^{-2}$  radian dengan *peak time* sebesar 5,757 sekon. *Maximum overshoot* yang didapatkan sebesar  $3,4 \times 10^{-1}$  radian dengan *settling time* sebesar 110,9 sekon. Respon mengalami osilasi dengan periode 16,67 sekon. Nilai osilasi terbesar adalah sebesar  $3,4 \times 10^{-1}$  radian yang terjadi pada detik ke-5,757. Respon tetap berosilasi hingga mencapai kondisi tunak pada detik ke-110,9.

Dari data yang telah didapatkan, dapat diartikan bahwa pada kondisi *sea state* 3, kapal FPB 57 sempat mengalami gerak oleng maksimal sebesar  $3,4 \times 10^{-1}$  radian dan mencapai keadaan tunak pada detik ke-110,9.

#### 4.2.7 Analisis Kapal FPB 57 dengan Gangguan Gelombang *Sea state* 4

Kondisi *sea state* 4 dikategorikan bersifat *moderate*. Kapal FPB 57 diujikan dengan menggunakan gelombang pada *sea state* 4 ( $h_{\text{maks}} = 2,5$  m)(tabel 2.3).

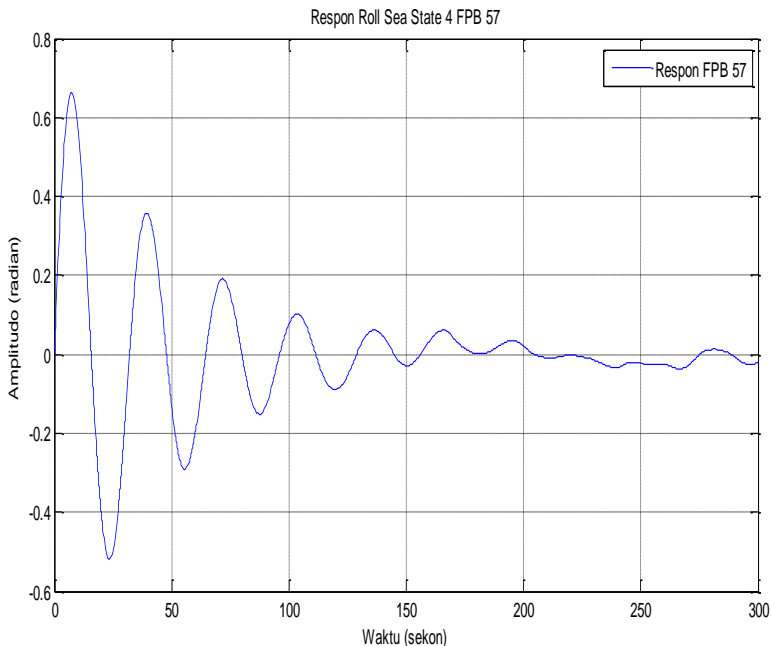


**Gambar 4.13** Respon *Close loop* Yaw *Sea state* 4



Dari hasil respon yang ditampilkan pada gambar 4.12, didapatkan *error steady state* sistem ketika diberi gangguan gelombang *sea state* 4 sebesar  $1.84 \times 10^{-2}$  radian dengan *peak time* sebesar 8,237 sekon. *Maximum overshoot* yang diperoleh sebesar  $6,67 \times 10^{-1}$  radian dengan *settling time* sebesar 192.2 sekon. Respon mengalami osilasi dengan periode 33,3 sekon. Puncak osilasi tertinggi adalah sebesar  $6,67 \times 10^{-1}$  radian yang dicapai pada detik ke-8,237. Respon tetap berosilasi hingga mencapai kondisi tunak pada detik ke-192,2.

Dari data yang diperoleh dapat dikatakan bahwa pada kondisi *sea state* 4, kapal FPB 57 sempat mengalami *yaw* maksimal sebesar  $6,67 \times 10^{-1}$  radian dan kembali kondisi tunak setelah detik ke-192,2.



**Gambar 4.14** Respon *Close loop* Roll *Sea state* 4

Dari respon yang ditampilkan pada gambar 4.13 di atas, didapatkan *error steady state* sebesar  $5,3 \times 10^{-2}$  radian dengan *peak time* sebesar 7,231 sekon. *Maximum overshoot* yang dihasilkan

sebesar  $6,701 \times 10^{-1}$  radian dengan *settling time* sebesar 162,8 sekon. Respon mengalami osilasi dengan periode 25 sekon. Puncak osilasi tertinggi adalah sebesar  $6,701 \times 10^{-1}$  radian yang terjadi pada detik ke-7,231. Osilasi respon tetap berlangsung hingga respon mencapai keadaan tunak pada detik ke-162,8.

Berdasarkan data yang diperoleh, dapat diartikan bahwa pada kondisi *sea state* 4, kapal FPB 57 sempat mengalami gerak oleng maksimal sebesar  $6,701 \times 10^{-1}$  radian dan kembali ke keadaan tunak pada detik ke-162,8.

### 4.3 Pembahasan

Perancangan kendali kestabilan *seakeeping* untuk kapal FPB 57 telah dilakukan. Kendali kestabilan *seakeeping* dilakukan dengan menggunakan kendali logika *fuzzy*. Pada penelitian ini variable yang dikontrol adalah gerak *yaw* dan *roll* dari kapal. Hal ini penting mengingat dua gerak ini yang sangat dipengaruhi oleh gangguan yang dialami oleh kapal saat beroperasi di laut yakni gangguan gelombang. Dengan dipilihnya gerak *yaw* dan *roll* sebagai variabel yang dikendalikan, maka dalam sistem kendali diperlukan dua aktuator, masing masing *rudder* untuk mengendalikan gerak *yaw* serta *fin stabilizer* untuk gerak *roll*. Dengan adanya dua sistem yang dikontrol, maka dibutuhkan dua kendali logika *fuzzy* untuk masing masing digunakan di *rudder* dan *fin stabilizer*.

*Rudder* menggunakan kendali logika *fuzzy* dengan dua masukan, yakni *error yaw* serta *yaw rate*. Adapun keluaran dari kendali logika *fuzzy rudder* adalah *command rudder* untuk mengendalikan gerak *yaw* dari kapal. *Fin stabilizer* menggunakan kendali logika *fuzzy* dengan dua masukan yakni *error roll*, *error rollrate* serta keluaran yaitu *command motor fin* yang digunakan motor untuk menggerakkan *fin* sesuai dengan keadaan.

Setelah dilakukan perancangan sistem kendali *seakeeping* FPB 57, dilakukan pengujian sistem kendali tersebut tanpa menggunakan gangguan untuk mengetahui apakah kendali yang telah dirancang sesuai dengan *set point*. Untuk kendali gerak *yaw*

didapati gerak *yaw* stabil pada  $8 \times 10^{-5}$  radian dan kendali gerak *roll* stabil pada 0 radian.

Tabel 4.2 Data Analisis Uji Simulasi *Yaw* dengan Gangguan Gelombang

Gangguan Gelombang	<i>Maximum Overshoot</i>		<i>Peak Time</i>	<i>Settling Time</i>	<i>Error Steady State</i>
	Rad	derajat	(s)	(s)	
Sea State 1	0,0312	1,787	1,323	96,3	$9,78 \times 10^{-4}$
Sea State 2	0,1406	8,056	3,72	111,3	$1,08 \times 10^{-3}$
Sea State 3	0,3365	19,28	5,722	139,5	$1,49 \times 10^{-3}$
Sea State 4	0,6667	38,19	8,237	192,2	$1,84 \times 10^{-2}$

Tabel 4.3 Data Analisis Uji Simulasi *Roll* dengan Gangguan Gelombang

Gangguan Gelombang	<i>Maximum Overshoot</i>		<i>Peak Time</i>	<i>Settling Time</i>	<i>Error Steady State</i>
	Rad	Derajat	(s)	(s)	
<i>Sea State 1</i>	0,0262	1,50	1,204	43,32	$3,86 \times 10^{-4}$
<i>Sea State 2</i>	0,138	7,90	4,035	96,61	$5,44 \times 10^{-3}$
<i>Sea State 3</i>	0,34	19,48	5,757	110,9	$1,34 \times 10^{-2}$
<i>Sea State 4</i>	0,6701	38,39	7,231	162,8	$5,3 \times 10^{-2}$

Dari data yang ditampilkan pada tabel 4.2 dan tabel 4.3 di atas, maka dapat disimpulkan semakin besar gangguan yang diberikan atau terjadi, maka semakin besar *error steady state*, *maximum overshoot*, *peak time* serta *settling time* yang dihasilkan. Selain itu, pada kondisi *sea state* 4 terjadi *overshoot* gerak *roll* sebesar 0.6711 radian atau 38.39 derajat. Berdasarkan data spesifikasi kapal FPB 57, gerak *roll* maksimal yang dapat dialami oleh kapal FPB 57 adalah 23 derajat, sehingga kapal FPB 57 akan tebalik bila mengalami gerak *roll* lebih dari 23 derajat. Dari data yang diperoleh, dapat disimpulkan kapal FPB 57 dapat beroperasi normal hingga kondisi *sea state* 3.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- Bhattacharya, Rameswar. (1978). *Dynamic of Marine Vehicles*. New York.
- Edward V. Lewis. (1989). *Principles of Naval Architecture*. Second Ed, Vol II. New Jersey
- Fang, M. C., Lin, Y. H., & Wang, B. J. (2012). *Applying The PD Controller On The Roll Reduction And Track Keeping For The Ship Advancing In Waves*. *Ocean Engineering*, 54, 13–25.  
doi:10.1016/j.oceaneng.2012.07.006
- Fossen, Thor. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicle*. John Willey & Son. USA: John Willey & Sons, Inc
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*.  
doi:10.1002/9781119994138
- Kusumadewi, Sri. (2003). *Artificial Inteligence*. Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Ogata, K. (1992). *Modern Control Engineering*. Second Ed. Prentice Hall, London.
- Perez, T. (2005). *A Review of Geometrical Aspects of Ship Motion in Manoeuvring and Seakeeping* , and the Use of a Consistent Notation. *Group*, (1), 1–30.

Price, W.G and Bishop, R.E.D (1974). ***Probablistic Theory of Ship Dynamics***. Chapman and Hall, London.

Riola, J. M., Esteban, S., Girón-Sierra, J. M., & Aranda, J. (2001). ***Motion and seasickness of fast warships***. *RTO AVT Symposium on "Habitability of Combat and Transport Vehicles: Noise, Vibration and Motion,"* 1–9.

Tomera, M. (2010). ***Nonlinear controller design of a ship autopilot***. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 20(2), 271–280. doi:10.2478/v10006-010-0020-8

Velagic, J., Vukic, Z., & Omerdic, E. (2003). ***Adaptive fuzzy ship autopilot for track-keeping***. *Control Engineering Practice*, 11, 433–443. doi:10.1016/S0967-0661(02)00009-6

## LAMPIRAN B

### PEMODELAN GANGGUAN

1. Pemodelan frekuensi tinggi :
  - Pemodelan gelombang frekuensi rendah *sea state* 2 ( $H = 0,5$  m).

Dengan  $\omega_0 = 0,4 \sqrt{\frac{g}{H_s}}$ ,  $\zeta = 0,1$ , dan  $K_w = 2\zeta\omega_0\tau_\omega$ . Dimana nilai  $g = 9,8$  m/s,  $H = 0,5$  meter,  $\tau_\omega = 3,16$ . Sehingga model gelombang laut pada persamaan di atas menjadi:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_H \\ \dot{\phi}_H \\ \dot{\psi}_H \\ \dot{\xi}_y \\ \dot{\xi}_\phi \\ \dot{\xi}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,3542 & 0 & 0 & -3,136 & 0 & 0 \\ 0 & -0,3542 & 0 & 0 & -3,136 & 0 \\ 0 & 0 & -0,3542 & 0 & 0 & -3,136 \\ I_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_H \\ \phi_H \\ \psi_H \\ \xi_y \\ \xi_\phi \\ \xi_\psi \end{bmatrix} + 1,1191 \begin{bmatrix} w_y \\ w_\phi \\ w_\psi \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix}$$

- Pemodelan gelombang frekuensi rendah *sea state* 3 ( $H = 1,25$  m).

Dengan  $\omega_0 = 0,4 \sqrt{\frac{g}{H_s}}$ ,  $\zeta = 0,1$ , dan  $K_w = 2\zeta\omega_0\tau_\omega$ . Dimana nilai  $g = 9,8$  m/s,  $H = 1,25$  meter,  $\tau_\omega = 3,16$ . Sehingga model gelombang laut pada persamaan di atas menjadi:

B-2

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_H \\ \dot{\phi}_H \\ \dot{\psi}_H \\ \dot{\xi}_y \\ \dot{\xi}_\phi \\ \dot{\xi}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,224 & 0 & 0 & -1,2544 & 0 & 0 \\ 0 & -0,224 & 0 & 0 & -1,2544 & 0 \\ 0 & 0 & -0,224 & 0 & 0 & -1,2544 \\ & & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_H \\ \phi_H \\ \psi_H \\ \xi_y \\ \xi_\phi \\ \xi_\psi \end{bmatrix} + 0,7078 \begin{bmatrix} w_y \\ w_\phi \\ w_\psi \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix}$$

- Pemodelan gelombang frekuensi rendah *sea state* 4 ( $H = 2,5$  m).

Dengan  $\omega_0 = 0,4 \sqrt{\frac{g}{H_s}}$ ,  $\zeta = 0,1$ , dan  $K_w = 2\zeta\omega_0\tau_\omega$ . Dimana

nilai  $g = 9,8 \text{ m/s}$ ,  $H = 2,5 \text{ meter}$ ,  $\tau_{\omega} = 3,16$ . Sehingga model gelombang laut pada persamaan di atas menjadi:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_H \\ \dot{\phi}_H \\ \dot{\psi}_H \\ \dot{\xi}_y \\ \dot{\xi}_\phi \\ \dot{\xi}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,1584 & 0 & 0 & -0,6272 & 0 & 0 \\ 0 & -0,1584 & 0 & 0 & -0,6272 & 0 \\ 0 & 0 & -0,1584 & 0 & 0 & -0,6272 \\ & & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_H \\ \phi_H \\ \psi_H \\ \xi_y \\ \xi_\phi \\ \xi_\psi \end{bmatrix} + 0,5005 \begin{bmatrix} w_y \\ w_\phi \\ w_\psi \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix}$$

2. Pemodelan frekuensi rendah – tinggi:

- Untuk ketinggian gelombang *sea state* 2 ( $H = 0,5$  meter)

$$A = \begin{bmatrix} A_L & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & A_H \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ -1,9754 & -0,5523 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0,0088 & -0,0465 & -0,3542 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & -0,3542 & 0 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & -0,3542 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3,136 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3,136 \end{bmatrix}$$



$$B = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0,4415 \\ \mathbf{0} & 0 & 0 & 1,1985 \\ & 0 & 0 & 0,0005 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_L \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ 121,589 & 58,3378 & 9,0852 & & & \\ 58,3788 & 158,368 & 4,3590 & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ 0 & 0 & 124,533 & & & \\ & & & 0 & 0 & 1,1191 \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & 0 & 0 & 1,1191 \\ & & & 0 & 0 & 1,1191 \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

- Untuk ketinggian gelombang *sea state* 3 (H = 1,25 meter)

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_L & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_H \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{I}_{3 \times 3} & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ & -1,9754 & -0,5523 & -0,0969 & & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -1,6649 & 0,0088 & -0,0465 & -0,224 & 0 & 0 & -1,2544 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & -0,3131 & 0 & -0,224 & 0 & 0 & -1,2544 & 0 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & 0 & 0 & -0,224 & 0 & 0 & -1,2544 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_L \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0,4415 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 1,1985 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0,0005 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_L \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ 121,589 & 58,3378 & 9,0852 & & & \\ 58,3788 & 158,368 & 4,3590 & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ 0 & 0 & 124,533 & & & \\ & & & 0 & 0 & 0,70784 \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & 0 & 0 & 0,70784 \\ & & & 0 & 0 & 0,70784 \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

## B-2

- Untuk ketinggian gelombang *sea state* 4 ( $H = 2,5$  meter)

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_L & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_H \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ -1,9754 & -0,5523 & -0,0969 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0,0088 & -0,0465 & -0,1584 \\ 0 & 0 & -0,3131 & 0 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & -0,1584 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,1584 & 0 \\ -0,6272 & 0 & 0 & -0,6272 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,6272 & 0 & 0 & -0,6272 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ & 0 & 0 & 0,4415 \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 1,1985 \\ & & 0 & 0 & 0,0005 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ 121,589 & 58,3378 & 9,0852 & & \\ 58,3788 & 158,368 & 4,3590 & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ 0 & 0 & 124,533 & & \\ & & & 0 & 0 & 0,5005 \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & 0 & 0 & 0,5005 \\ & & & 0 & 0 & 0,5005 \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

## BAB V PENUTUP

Bab ini terdapat kesimpulan dari data yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan dan saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya.

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini telah dirancang system kendali logika *fuzzy* dalam menjaga kestabilan *seakeeping* pada kapal FPB 57 dengan aktuator *rudder* dan *fin stabilizer* dengan masukan berupa *error yaw*, *yaw rate*, *error roll* dan *roll rate* dengan keluaran *command rudder* dan *command motor fin*.
2. Performasi kendali pada gangguan gelombang.

Untuk gerak *yaw*:

*Sea state 1, error steady state* =  $9.78 \times 10^{-4}$

*Sea state 2, error steady state* =  $1.08 \times 10^{-3}$

*Sea state 3, error steady state* =  $1.49 \times 10^{-3}$

*Sea state 4, error steady state* =  $1.84 \times 10^{-2}$

Untuk gerak *roll*:

*Sea state 1, error steady state* =  $3.86 \times 10^{-4}$

*Sea state 2, error steady state* =  $5.44 \times 10^{-3}$

*Sea state 3, error steady state* =  $1.34 \times 10^{-2}$

*Sea state 4, error steady state* =  $5.3 \times 10^{-2}$

3. Kendali *fuzzy* untuk gerak *roll* telah sesuai dengan kemampuan teknis FPB 57, dimana sesuai dengan kemampuan teknis kapal FPB 57 dapat beroperasi hingga *sea state 3*.

## 5.2 Saran

Saran yang diperoleh dari penelitian ini adalah perlunya pengembangan mode kendali yang berbeda untuk peningkatan performansi sistem dan kestabilan *sea keeping* dari kapal FPB 57.

## LAMPIRAN A

### PEMODELAN DINAMIKA KAPAL

Dinamika kapal dimodelkan berdasar dari spesifikasi kapal. Kapal yang digunakan adalah kapal FPB 57. Berikut spesifikasi umum dari kapal FPB 57:

Panjang

LOA : 58,1 meter

LWL : 54,4 meter

Lebar (*Beam*) : 7,62 meter

Tinggi (*Height*) : 4,75 meter

Sarat (*Draught*) : 2,95 meter

Kecepatan Kapal : 28 knot = 14,4 m/s

Massa Kapal

LWT : 300 ton

DWT : 445 ton

Koefisien blok : 0,43

*Rudder area* : 1,72 m<sup>2</sup>

*Longitudinal Center of Gravity* (LCG) : 23,27 meter

*Vertical Center of Gravity* (VCG) : 3,975 meter

$A_f$  (luasan penampang *fin*) : 1,72 m<sup>2</sup>

Massa jenis air laut : 1014 kg/m<sup>3</sup>

Koefisien *Lift* : 6,26

Sudut yang dibentuk

*fin stabilizer* terhadap *water line* : 60°

Kapal FPB 57: KRI Todak (803)



Pemodelan dilakukan berdasarkan model matematik yang diturunkan Nomoto:

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,16 \frac{C_B B}{T} - 5,1$$

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 - 0,4 \frac{C_B B}{T}$$

$$\frac{-Y'_p}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2,2 \frac{B}{L} - 0,08 \frac{B}{T}$$

$$\frac{-Y'_p}{\pi(T/L)^2} = 0,67 \frac{B}{L} - 0,08 \left(\frac{B}{T}\right)^2$$

$$\frac{-K'_p}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{4} + 0,039 \frac{B}{T} - 0,56 \frac{B}{L}$$

$$\frac{-K'_p}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0,017 \frac{C_B B}{T} - 0,33 \frac{B}{L}$$

$$Y_\delta = \rho \frac{\pi A_\delta}{4 L T}$$

$$N_\delta = -\frac{1}{2} Y_\delta$$

Berdasar spesifikasi yang diketahui, didapatkan parameter tak berdimensi.

$$\begin{array}{ll}
 Y'_p = 0,0036 & K'_p = 0,0021 \\
 Y'_v = -0,0099 & K'_v = -0,0058 \\
 Y'_r = -0,0006 & I'_r = 0,0002 \\
 K'_p = -0,0007 & I'_x = 0,0002 \\
 K'_v = -0,0004 & Y'_\delta = 0,0084 \\
 Y'_v = -0,0134 & N'_\delta = -0,0042 \\
 Y'_p = -0,0055 & K'_\delta = -0,7568 \\
 Y'_r = 0,0036 &
 \end{array}$$

Kemudian dapat dibentuk menjadi matrik sebagai berikut:

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_v & -mZ_G - Y_p & mX_G - Y_r \\ -mZ_G - Y_p & I_x - K_p & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_r \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 0,0099 & -0,0036 & -0,0006 \\ -0,0036 & 0,0076 & 0 \\ 0 & 0 & 0,008 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & -Y_r \\ -Y_p & -K_p & 0 \\ 0 & 0 & -N_r \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0,0134 & 0,0055 & 0,006 \\ 0,0055 & -0,0021 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0025 \end{bmatrix}$$

A-2

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ K_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,7568 \\ -0,0042 \end{bmatrix}$$

Dengan sifat invers matriks, didapatkan matriks *state space*:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,9754 & -0,5523 & -0,0969 \\ -1,6649 & 0,0088 & -0,0465 \\ 0 & 0 & -0,3131 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,4415 \\ 1,1985 \\ 0,0005 \end{bmatrix} \delta_R$$